

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra aplikované mechaniky

**Návrh a pevnostní kontrola
kompozitní hlavně pro 120 mm
minomet**

Design and Structural Analysis of
120 mm Mortar Composite Barrel

Student:

Bc. Petr Matějů

Osobní číslo:

MAT0286

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Stanislav Polzer, Ph.D.

Ostrava 2020

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Petr Matějů**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 3901T003 Aplikovaná mechanika

Téma: **Návrh a pevnostní kontrola kompozitní hlavě pro 120mm minomet**
Design and Structural Analysis of 120mm Mortar Composite Barrel

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

- 1) Provést řešerskou analýzu typů minometů a materiálů využívaných pro jejich výrobu.
- 2) Sestavit výpočtový model 120mm hlavě minometu.
- 3) Provést MKP simulaci výstřelu ze 120mm minometu a analyzovat přetvoření a napětí v ocelové hlavě.
- 4) Navrhnout kompozitní hlavě z alespoň dvou vybraných jednosměrových dlouhovláknových kompozitních materiálů
- 5) Zhodnotit možnou úsporu hmotnosti, případně možný nárůst pracovního tlaku proti ocelové hlavě.

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] Schmidt J, Nusca MJ, and Horst AW. 2009. Mortar Interior Ballistics: Sensitivity Studies Using IBHVG2 and Progress Toward a Multidimensional Representation. Army Research laboratory TR4838
- [2] Mekaniikka R. 2011. Force, pressure and strain measurements for traditional heavy mortar launch cycle. J Struc Mech 44(4):309-329
- [3] Jones R. Mechanics of composite materials. Taylor and Francis 1999.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Stanislav Polzer, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020


doc. Ing. Martin Fusek, Ph.D.
vedoucí katedry





prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.


V Ostravě dne 18. května 2020.


.....
Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB – TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB – TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18. května 2020.


.....
Podpis studenta

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce, panu doc. Ing. Stanislavu Polzerovi, Ph.D. za vedení mé práce, trpělivost a cenné rady. Dále bych rád poděkoval panu doc. Ing. Radimu Halamovi, Ph.D. za poskytnuté materiály. Navíc bych chtěl velmi ocenit podporu svých přátel a rodiny.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Matějů,P. *Návrh a pevnostní kontrola kompozitní hlavně pro 120mm minomet: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra aplikované mechaniky, 2020, 79 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Stanislav Polzer, Ph.D.

Diplomová práce se zabývá návrhem kompozitní hlavně pro 120mm minomet. V úvodu je zpracována rešeršní analýza typů minometů a materiálů využívaných pro jejich výrobu. Následně je provedena simulace výstřelu z ocelové hlavně minometu a je zanalyzováno napětově-deformační chování součásti. Poté je navržen kompozitní materiál, který je použit k úpravě hlavně. Jsou zpracovány dvě varianty kompozitní hlavně, které jsou porovnány s ocelovou variantou. Provedené úpravy mají za cíl snížení hmotnosti zbraně při zachování funkčnosti.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

Matějů,P. *Design and Structural Analysis of 120mm Mortar Composite Barrel: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Applied Mechanics, 2020, 79 p. Thesis head: doc. Ing. Stanislav Polzer, Ph.D.

Master thesis is focused on design and structural analysis of 120 mm mortar composite barrel. The beginning of the thesis is aimed on a theoretical background of mortar usage. There is also discussed a problematic of materials which are used for manufacturing of mortar barrels. The next part of thesis is based on simulation of conventional mortar barrel gunshot. Gunshot behavior of the mortar barrel is analyzed and used as a template for the following optimization. The main task of thesis is to use a composite to optimize the steel model. The goal of the optimization is to reduce a mass and preserve a function of the component.

Obsah

Obsah.....	7
1. Úvod.....	9
2. Minomety.....	10
2.1. Historický kontext.....	10
2.2. Co je to minomet?.....	10
2.3. Klasifikace minometů.....	11
2.4. Obsluha minometu.....	11
2.5. Vnitřní balistika.....	12
2.6. Konstrukce hlavně.....	15
3. Kompozitní materiály.....	16
3.1. Co jsou to kompozitní materiály?.....	16
3.2. Klasifikace a charakteristika kompozitních materiálů.....	17
3.2.1. Vláknové kompozity.....	17
3.2.2. Vrstvené kompozity (Lamináty).....	20
3.2.3. Částicové kompozity.....	21
3.2.4. Kombinace kompozitních materiálů.....	22
4. Mechanické chování kompozitních materiálů.....	23
4.1. Makromechanika kompozitů.....	23
4.1.1. Objemový podíl vláken a matrixu.....	24
4.1.2. Mechanické a fyzikální vlastnosti konstituentů kompozitů.....	26
4.1.3. Směšovací pravidlo.....	27
4.1.4. Vlastnosti transversálně izotropního materiálu.....	27
4.1.5. Kritéria selhání kompozitu.....	29
5. Formulace problematiky a cílů práce.....	31
6. Sestavení výpočtového modelu.....	32
6.1. Geometrie.....	32
6.2. Materiál.....	33
6.2.1. Volba materiálu.....	33
6.2.2. Závislost materiálových vlastností na rychlosti zatěžování.....	34
6.2.3. Model plasticity.....	34

6.3.	Konečnoprvková síť	36
6.4.	Okrajové podmínky	37
6.4.1.	Uchycení modelu.....	37
6.4.2.	Definice zatížení.....	38
6.5.	Nastavení analýzy a konvergence časového kroku.....	40
7.	Simulace výstřelu z ocelové hlavně minometu	41
7.1.	Vyhodnocení autofretáže ocelové hlavně	41
7.2.	Vyhodnocení výstřelu z ocelové hlavně	43
8.	Návrh kompozitní hlavně	45
8.1.	Geometrie.....	45
8.2.	Návrh laminy kompozitního materiálu	46
8.2.1.	Volba konstituentů kompozitu	46
8.2.2.	Tvorba laminy kompozitu	47
8.2.3.	Stanovení mezí pevnosti kompozitu.....	47
8.3.	Návrh kompozitní hlavně.....	50
8.3.1.	Návrh 1	51
8.3.2.	Návrh 2	58
8.4.	Vyhodnocení autofretáže (kompozitní hlaveň).....	66
8.4.1.	Návrh 1	66
8.4.2.	Návrh 2	66
8.5.	Vyhodnocení výstřelu z kompozitní hlavně	67
8.5.1.	Návrh 1	67
8.5.2.	Návrh 2	69
9.	Diskuse.....	71
10.	Omezení práce	73
11.	Závěr.....	74
13.	Bibliografie.....	75

1. Úvod

Vývoj zbraňových systémů je velmi inovativní oblast, ve které jsou kladeny ty největší nároky na řešení požadované problematiky. Po celou historii lidstva byla neustálá snaha o vylepšení zbraní tak, aby daly svému držiteli výhodu nad protivníkem. Vylepšení se mohou týkat vlastností, které přímo ovlivňují funkčnost zbraně. Může se jednat o nový způsob použití zbraně, nebo také o úpravy, které zvyšují její bojovou hodnotu. Příkladem může být lepší kvalita výroby, díky které je možné dosáhnout vyšší přesnosti, vyšší kadence nebo delší životnosti. Úpravy, které nepřímo ovlivňují bojovou hodnotu zbraně, jsou také velice žádoucí. Snížení hmotnosti je příkladem této modifikace. Díky snížení hmotnosti zbraní, respektive zbraňových systémů je možné dosáhnout velkého množství benefitů. U příručních zbraní je přímá vazba hmotnosti na mobilitu vojáka. Lehčí zbraň znamená větší komfort při obsluze a také nižší nároky na fyzickou zdatnost vojáka. Tyto faktory mohou znamenat rozdíl mezi životem a smrtí, a proto jsou klíčové. Snížení hmotnosti se dosahuje změnou konstrukce nebo změnou materiálu.

Tato diplomová práce se zabývá pěchotním minometem a snahou o snížení jeho hmotnosti. Pěchotní minomety jsou zpravidla přemísťovány manuálně lidmi, a proto je minimální hmotnost jednou z klíčových vlastností této zbraně. Proto je každý uspořené kilogram žádoucí. Minomety jsou obvykle vyrobeny z oceli, což je konvenční a velice dobře známý materiál. Výhodou ocelí je jejich poměr cena/výkon. Jiné materiály, jako je například titan, mohou být pro určitou aplikaci vhodnější, nicméně jsou příliš drahé. Nevýhodou ocelí je jejich vysoká hustota, proto jsou komponenty z ní vyrobené relativně těžké. Řešením, které kombinuje nízkou hmotnost a nižší poměr cena/výkon, jsou kompozitní materiály. Kompozity umožňují přizpůsobení materiálových vlastností dané aplikaci, což je další benefit, díky kterému je možné dále snížit hmotnost komponenty. Minomet ale není možné vyrobit pouze z kompozitu, protože podmínky panující během výstřelu uvnitř hlavně jsou příliš extrémní.

Cílem práce je navržení úpravy minometu s použitím kompozitu. Navržená řešení by měla zachovat funkčnost při snížení hmotnosti zbraně.

2. Minomety

2.1. Historický kontext

Dělostřelectvo je důležitou součástí moderních armád. Jeho historie sahá až do období pozdního středověku a původně mělo za úkol prolomovat opevnění nepřátelských sídel a opěrných bodů. V průběhu času se toto zbrojní odvětví významně vyvíjelo a mnohé pokroky v této oblasti znamenaly rozdíl mezi vítězstvím a prohrou jednotlivých armád.

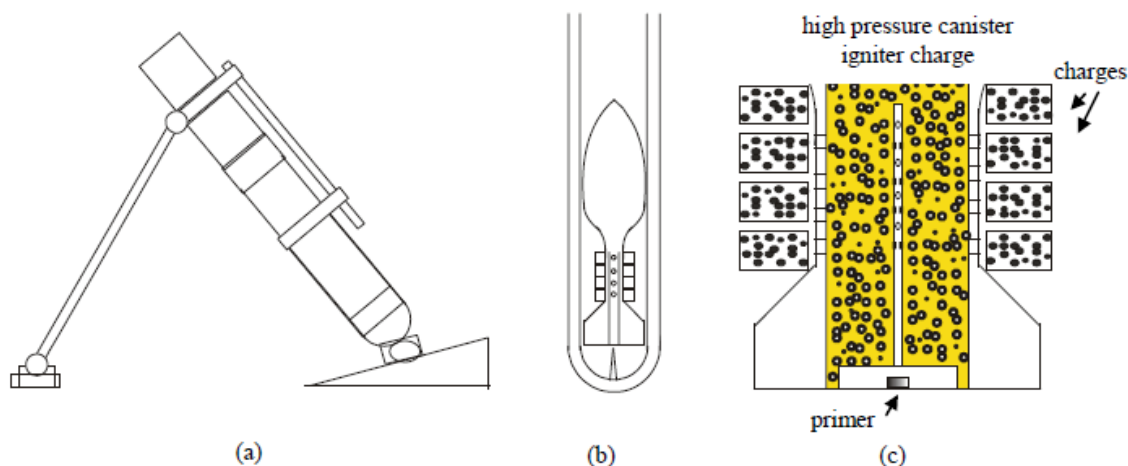
Nejdříve se objevovaly zbraně, které pálily přímo na cíl a využívaly rozsah náměru $\theta = (0 \div 45)^\circ$. Náměr θ je úhel, který svírá osa hlavně s vodorovnou rovinou. Výhodou přímé palby je její přesnost a také jednodušší ovládání zbraně jako takové. Nicméně se časem ukázalo, že některé cíle jsou tímto způsobem střelby obtížně eliminovatelné. Řešením tohoto problému se stal náměr hlavně v rozsahu $\theta = (45 \div 85)^\circ$. Při náměru v rozsahu $\theta = (85 \div 90)^\circ$ může dojít k zásahu palebného stanoviště, proto je maximální úhel omezen. Nepřímý způsob střelby umožnil vyřadit cíle do té doby jen obtížně zdolatelné. Tímto inovativním krokem byl vynalezen minomet. První mobilní minomety byly použity již na konci 17. století. V průběhu historie se ukázala užitečnost a efektivita těchto zbraní, a to zejména proti opevněným a zakopaným cílům. Tento fakt je nemalou měrou ovlivněn právě náměrem, pod kterým minomety pálí. V průběhu první světové války se význam minometů podstatně zvýšil, a to díky stylu tehdejšího boje. Kvůli zákopové válce bylo použití minometů prakticky nezbytností, neboť většina pozic protivníka byla schována v zákopech a v opevněných stanovištích. [1]

2.2. Co je to minomet?

Jak již bylo zmíněno výše, jedná se o dělostřeleckou zbraň, která je většinou nabíjena ústím hlavně. Dělostřelecké zbraně se dělí na ty, které využívají náměr v rozsahu dolní skupiny úhlů a horní skupiny úhlů. Minomety využívají horní skupinu úhlů a díky tomu pálí nepřímě. Nepřímá palba má tu nevýhodu, že její zaměření je komplikovanější než u přímé palby, kterou využívají klasická děla. Výhodou je schopnost ničit těžko eliminovatelné cíle. Navíc opevnění, respektive pancéřování bývá z horního směru slabší, pokud je vůbec nějaké. Dalším znakem minometů je relativně krátká hlaveň, mají tedy malý poměr délky ku průměru hlavně při porovnání s jinými zbraněmi. Často je hlaveň dlouhá méně než 20 kalibrů [1].

Stavba minometů je relativně jednoduchá. Základem je trubice, která je zpravidla vyrobena z oceli. Na jednom konci je trubice zaslepena, této části se říká závěr. Součástí závěru je úderník, který má za úkol zaktivovat základní náplň střely. Na straně závěru je komponenta, která slouží k zapření zbraně o terén, nebo o jiný podklad. Součástí sestavy je často také dvojnožka, pomocí které je možné nastavovat různé úhly náměru podle potřeby. Právě jednoduchost konstrukce je velkou výhodou této zbraně. Jednoduchost jde

ruku v ruce s nízkými nároky na údržbu, což je v polních podmínkách klíčový faktor. Díky jednoduchosti není použití zbraně pro vojáka složité a nízké nároky na údržbu dovolují dlouhou službu minometu bez nutnosti častých odborných zásahů techniků. Navíc je minomet možné použít prakticky v jakýchkoliv povětrnostních podmínkách, což dále zvyšuje význam této zbraně na bitevním poli [2].



Obr. 1 – Schéma minometu: (a) boční pohled minometu, (b) projektil v hlavni, a (c) průřez ocasem projektilu [1]

2.3. Klasifikace minometů

Ze stavby minometu do velké míry vyplývá i jeho fungování a obsluha. Minomety se dají rozdělit do tří typů. Těmito typy jsou lehké minomety, střední minomety a těžké minomety. Lehké minomety se snadno transportují a jsou relativně malé a s nízkou vahou. Jejich ráže se pohybuje kolem 60 mm. Dostřel těchto zbraní není nijak velký a činí 1 až 3 km. Jsou používány menšími bojovými jednotkami. Tento typ nemusí mít dvojnožku, a proto nebývají příliš přesné. Dalším typem jsou střední minomety. Jejich ráže se pohybuje okolo 80 mm a mají dostřel do 7 km. Vzhledem k jejich vyšší hmotnosti je potřeba asi tří vojáků k přemístění. Posledním typem jsou těžké minomety, jejichž nejčastější ráže se pohybuje od 107 do 120 mm. Dostřel je větší než 7 km a je nutno je přepravovat s pomocí vozidel různého charakteru [3].

2.4. Obsluha minometu

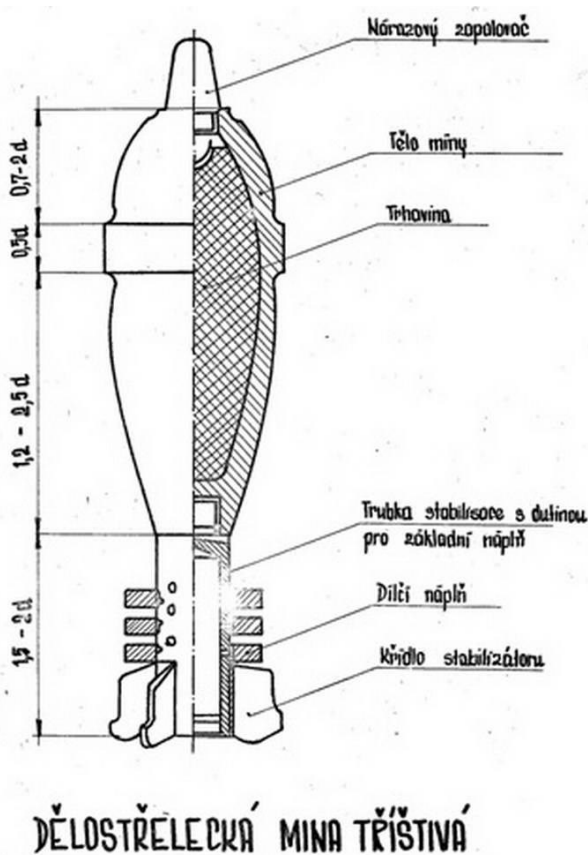
Z pohledu obsluhy zbraňového systému je užití minometu relativně jednoduché. Minomet se musí ustavit do požadované pozice a s požadovaným náměrem. Zbraň by měla být na dostatečně pevném podkladu, aby byla stabilní během výstřelu a neohrozila obsluhu. Následně je do hlavně spuštěn projektil, který je po určité prodlevě vypálen na cíl. Tento proces je možné opakovat velice rychle. Například finský minomet 120 KRH 92 je schopen vypálit až 15 ran za minutu [4]. Kadence je limitována prodlevou mezi vpuštěním střely do hlavně a jejím vypálením a také výcvikem a zručností obsluhy. Díky

jednoduchosti a efektivitě jsou tyto zbraně velice populární a jsou ve výzbroji praktický každé armády na světě.

2.5. Vnitřní balistika

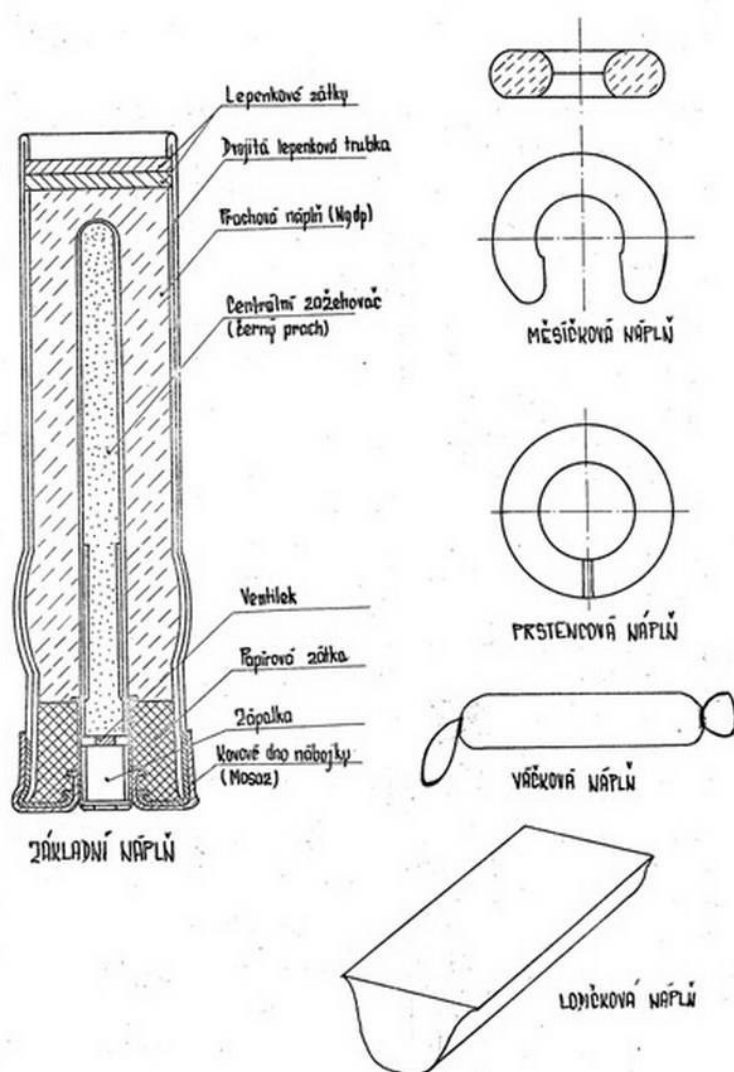
Mechanismus vypálení projektilu je na první pohled jednoduchý, nicméně při podrobnějším výzkumu se jedná o velice komplexní děj. Vnitřní balistika je disciplína, která se zabývá popisem fyzikálních jevů, které se odehrávají při pohybu střely v hlavní do okamžiku, kdy ji střela opustí. [5]

Pro porozumění fungování je potřeba nejdříve vysvětlit stavbu minometné střely. Popisovaným příkladem bude tříštivá dělostřelecká mina. Na čele miny je nárazový zapalovač, který slouží k iniciaci trhaviny při dopadu. Další částí je tělo miny, které je naplněno trhavinou. Při explozi trhaviny dojde k roztržení těla, čímž vzniknou střepiny. Letící střepiny mají větší dosah než samotný výbuch trhaviny a tím zvyšují ničivý účinek miny. Další částí projektilu je trubka stabilizace s dutinou pro základní náplň. Tato část má v sobě velké množství děr. Při zažehnutí základní náplně dojde k vývoji velkého množství plynu a ten uniká právě přes již zmíněné díry v trubce stabilizace. V místě děr je také možné umístit dílčí náplně pro větší množství vyvinutého plynu. Na trubce stabilizace jsou dále připevněna křídélka stabilizace. Křídélka stabilizace udržují projektil nasměrovaný ve směru letu. Všechny tyto části jsou znázorněny na Obrázku 2 [2; 6].



Obr. 2 – Konstrukce tříštivé dělostřelecké miny [6]

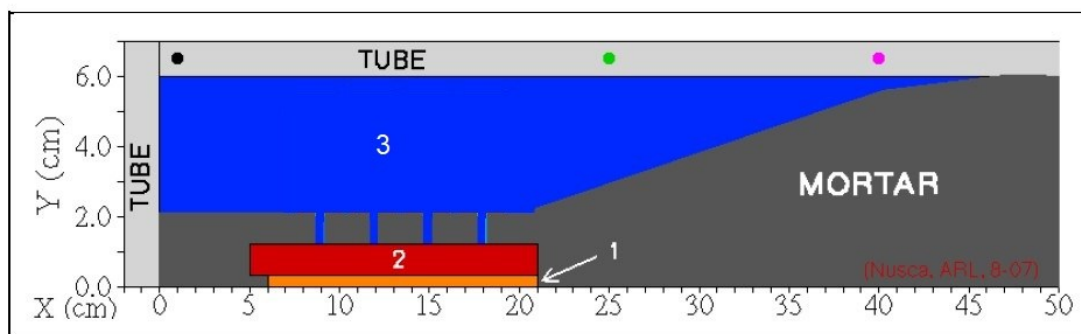
Náplň střely má za úkol vyvinout velké množství plynu, který způsobí nárůst tlaku v hlavni a tím dojde k vypálení projektilu. Základní náplň je v mině vždy přítomna. Bez ní by nemohlo dojít k vystřelení projektilu ven z hlavně. Základní náplň je sestavena hned z několika částí. Na povrchu musí být obalový materiál, který ale nesmí být příliš odolný, aby došlo k jeho zničení během vznícení náplně. Další částí je prachová náplň, která se stará o vývoj největšího množství plynu. Jejím vyhořením vznikne velké množství plynu a projektil je vypálen ven z hlavně. Uvnitř prachové nálože je centrální část, která se nazývá centrální zažehovač. Tato část má za úkol co nejrychlejší zapálení celé základní náplně, aby došlo k maximálnímu nárůstu tlaku v hlavni. Centrální zažehovač je ventilkem oddělen od tzv. zápalky neboli roznětky. Při dopadu miny na závěr s úderníkem dojde k proniknutí úderníku do roznětky a ta se zažehne. Zažehnutím roznětky se postupně zažehne centrální zažehovač a prachová náplň a tím dojde k vystřelení miny. K vyvinutí většího množství hnacích plynů je možné připevnit na střelu tzv. dílčí náplně. Ty se dají připevnit na trubku stabilizátoru nebo na stabilizační křídélka. Použitím dílčích náplní je možné docílit většího dostřelu při zachování původního náměru hlavně [6].



Obr. 3 – Konstrukce základní náplně a dílčích náplní [6]

Byla popsána konstrukce dělostřelecké miny. Z jejího fungování je možné vyvodit, jak vypadá mechanismus vypálení střely z hlavní. Mechanismus je následovný. Střela padá hlavní směrem k závěru s úderníkem. V momentě, kdy dopadne na konec tubusu hlavní, dojde k proniknutí úderníku do roznětky a tím ji zapálí. Z roznětky se hoření šíří dále do centrálního zažehovače. Centrální zažehovač zapálí prachovou náplň a ta velmi rychle vyhoří. V trubce stabilizátoru vzniklá velké množství žhavého plynu. Ten uniká do prostoru hlavní a v případě přítomnosti dílčích náloží zapaluje i je. Bez dílčích náloží dojde k tlakové špičce ve chvíli, kdy dohořívají zbytky základní náplně a projektil je vystřelen ven z hlavní. Při použití dílčích náplní je situace mírně jiná. Po zažehnutí základní náplně dojde k navazujícím zážehům dílčích náplní. Tím se podstatně zvýší maximální tlak v hlavní a dojde k rychlejšímu vypálení střely [6].

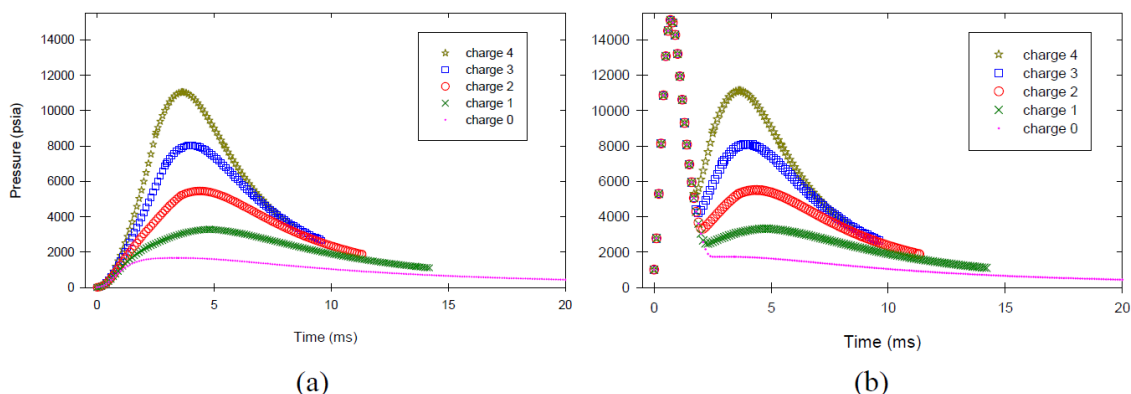
Prostor, ve kterém dochází k natlakování, je možné rozdělit na dvě části. První částí je vnitřní komora, což je vnitřní prostor trubky stabilizátoru, na Obr. 4 se jedná o oblast 1 a 2. Druhou částí je vnější komora, což je prostor mezi projektil a hlavní, na Obr. 4 se jedná o oblast 3. Ve vnitřní komoře dochází k prvotnímu zážehu a vývoj tlaku je zcela nezávislý na vnější komoře. Tlak ve vnitřní komoře narůstá do chvíle, kdy dojde k proražení oddělovací membrány. Poté se začne tlakovat i vnější komora. Tlaková špička poté závisí na počtu dílčích náplní [1].



Obr. 4 – Schéma znázorňující vnitřní (oblast 1 a 2) a vnější komoru (oblast 3) (upraveno) [1]

Na Obr. 5 [1] jsou zobrazeny dva grafy simulovaného tlakového průběhu v závislosti na čase. Levý graf platí pro tlak ve vnější komoře. Pravý graf platí pro tlak ve vnitřní komoře. Tlak je v jednotkách psi ($1 \text{ psi} = 0,006895 \text{ MPa}$), nicméně pro pochopení chování není potřeba převádět tlak na MPa. Z grafů je patrné, že ve vnější komoře dojde k dosažení tlakové špičky a následnému poklesu tlaku zpět na původní hodnotu. Ve vnitřní komoře je situace jiná. Vyskytují se zde dvě tlakové špičky. První tlaková špička nastává v době, kdy hoří pouze základní náplň. Když nejsou přítomny dílčí náplně, jedná se o jedinou tlakovou špičku. Nicméně při použití dílčích náplní je patrné, že dojde k druhé tlakové špičce. To je zapříčiněno zažehnutím a vyhořením dílčích náplní, což způsobí opětovné zvýšení tlaku ve vnitřní komoře. Čím větší množství dílčích náplní je, tím je

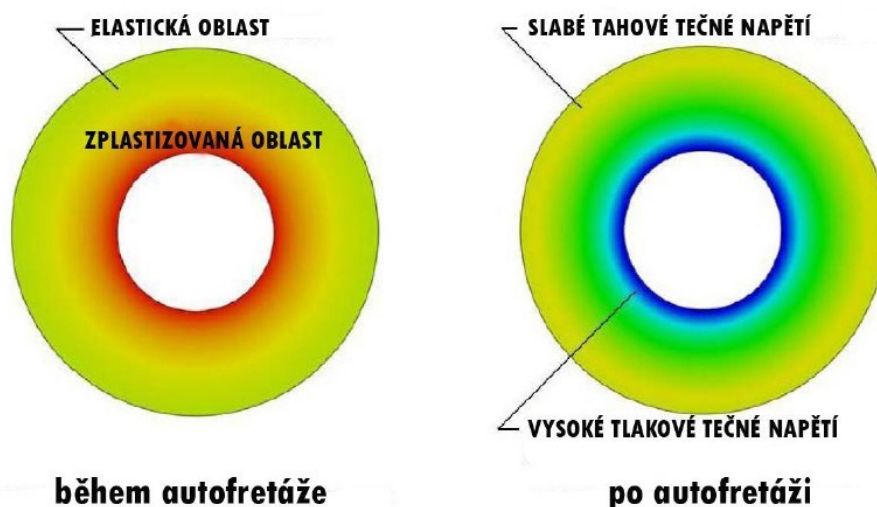
výsledný maximální tlak ve vnější komoře větší a tím se zvýší úst'ová rychlost vystřeleného projektilu.



Obr. 5 – Simulovaný tlakový průběh během výstřelu pro (a) vnější komoru a (b) vnitřní komoru s různým počtem dílčích náplní [1]

2.6. Konstrukce hlavně

Hlavně minometů jsou relativně jednoduchou, nicméně klíčovou komponentou tohoto zbraňového systému. Častou úpravou vnitřního povrchu hlavně je tzv. autofretáž. Tato úprava se provádí ještě před prvním použitím minometu. Autofretáž má za cíl vytvoření plastické deformace na vnitřním průměru hlavně a po odlehčení dojde ke vzniku tlakových napětí právě na vnitřním průměru hlavně [7]. To je způsobeno nevratnou plastickou deformací vyvozenou během procesu autofretáže. Na Obr. 6 [8; 9] je znázorněn popisovaný princip tohoto procesu. Autofretáž je možno realizovat hned několika způsoby. První používaná technika je určená pro rovné tlustostěnné trubky. Technologický postup spočívá v protahování trubky trnem, který má o něco větší průměr, než je vnitřní průměr trubky. Druhý způsob je vhodný pro složitější geometrie. V tomto případě se součást natlakuje kapalinou. Tlak kapaliny při autofretáži může dosáhnout až 1600 MPa [7].



Obr. 6 – Schéma principu autofretáže [8], [9]

Standardně je konstrukce hlavně z oceli. Tento materiál má velmi dobré mechanické vlastnosti a je široce používán. Díky dlouhé tradici ocelí v technické praxi není velký problém vyrobit prakticky cokoli z tohoto materiálu. Nicméně nevýhodou je vysoká hustota a z toho vyplývající vysoká hmotnost. Protože vojáci musí být rychlí a mobilní, je zbytečná váha nežádoucí a jakákoliv úspora v tomto ohledu je vítána. Jedním z řešení by mohlo být použití jiného materiálu, který váží méně než ocel. Kompozitní materiály jsou v tomto ohledu velmi dobrým kandidátem. Při správné volbě může být kompozit velice tuhý a pevný, což jsou žádané vlastnosti pro náročnou aplikaci, jakou je právě minomet. Výhodou kompozitu je podstatně nižší hmotnost, které je možné dosáhnout. Nicméně i tyto materiály mají své limity. Většina kompozitních materiálů by nevydržela příliš dlouho v podmínkách, které panují v hlavní během výstřelu. To je důvod, proč nemůže být hlaveň pouze z kompozitu. Nejlepším způsobem by mohlo být obalení ocelové hlavně kompozitním materiálem. Tloušťka ocelové stěny může být menší a tím je docíleno snížení hmotnosti. Následující část práce se bude zabývat kompozity.

3. Kompozitní materiály

3.1. Co jsou to kompozitní materiály?

V technické praxi jsou používány konvenční materiály jako oceli, hliníkové slitiny, polymery a jiné. Konvenční materiály se zpravidla vyznačují tím, že jsou homogenní a izotropní. Tyto materiály se používají nejčastěji tam, kde není předem znám směr působícího zatížení. Další oblastí jsou aplikace, kde není až tak důležitá hmotnost. V takovýchto aplikacích nedochází k optimálnímu využití materiálu, neboť ve směrech, ve kterých nepůsobí zatížení, nejsou jeho kapacity plně využity.

V situacích, kdy je potřeba dosáhnout minimální hmotnosti součásti, je velmi často přistupováno k použití kompozitních materiálů. Ty se od klasických liší svými vlastnostmi, výrobou i způsobem aplikace. Kompozity se skládají ze dvou a více různých materiálů, a to na makroskopické úrovni, což znamená, že jednotlivé komponenty lze rozeznat pouhým okem. V tom se kompozity liší například od slitin, kde se také kombinují dva a více materiálů, ale na mikroskopické úrovni. Slitiny se proto z makroskopického hlediska chovají jako homogenní [10].

Jak již bylo zmíněno, kompozity se skládají ze dvou a více konstituentů na makroskopické úrovni. Při správném návrhu kompozitu je následně možné získat lepší vlastnosti, než které mají jednotlivé konstituenty kompozitu. Může také dojít k situaci, kdy má výsledný materiál vlastnost, kterou ani jeden z konstituentů nemá. Vlastnosti, které mohou být při aplikaci kompozitních materiálů zlepšeny jsou uvedeny v Tab. 1 [10].

- | | |
|-----------------------------|---------------------------|
| • Pevnost | • Únavová životnost |
| • Tuhost | • Tepelně závislé chování |
| • Odolnost proti korozi | • Tepelná izolace |
| • Odolnost proti opotřebení | • Tepelná vodivost |
| • Atraktivita | • Akustická izolace |
| • Hmotnost | |

Tab. 1 – Typické vlastnosti, které mohou být zlepšeny s využitím kompozitních materiálů [10]

Prakticky nelze dosáhnout zlepšení ve všech vlastnostech zároveň. Takovýto požadavek na materiál ani nebývá specifikován. Navíc se některé vlastnosti navzájem vylučují, což se týká třeba tepelné vodivosti a tepelné izolace. Při návrhu kompozitních materiálů se soustředíme jen na zlepšení parametrů klíčových pro danou aplikaci. [10]

Z pohledu historie nejsou kompozity žádnou novinkou, nicméně se nedá přesně říct, kdy byly tyto materiály poprvé použity. Například Izraelité používali slámu ke zpevnění hliněných cihel nebo Egypťané vynalezli překližku a tím docílili vyšší pevnosti dřevěných konstrukcí [10].

3.2. Klasifikace a charakteristika kompozitních materiálů

Existují 4 běžně akceptované typy kompozitních materiálů [10]:

- Vláknové kompozity
- Vrstvené kompozity (Lamináty)
- Částicové kompozity
- Kombinované kompozity z předchozích 3 typů

3.2.1. Vláknové kompozity

3.2.1.1. Dlouhovlákné vs. Krátkovlákné kompozity

Vláknové kompozity se dělí na dva typy. Na dlouhovlákné a krátkovlákné kompozity. Přestože se tyto dva typy mohou skládat ze stejných materiálů, liší se svými vlastnostmi. Hlavním rozdílem mezi těmito materiály je mechanismus přenosu zatížení. U dlouhovlákných kompozitů je většina zatížení přenášena vlákny a pouze v případě přerušení některých z nich dochází k přenosu zatížení skrz matrix na okolní vlákna. Toho je dosaženo orientací vláken ve směru zatížení. Naproti tomu princip přenosu zatížení u krátkovlákných kompozitů je přímo založen na interakci vláken a matrixu. Navíc jsou krátká vlákna zpravidla náhodně orientovaná v matrixi. V důsledku těchto rozdílů jsou mechanické vlastnosti dlouhovlákných kompozitů ve směru vláken vždy vyšší než u krátkovlákných kompozitů [10; 11].

3.2.1.2. Vláknna

Dlouhá vlákna se vyznačují mnohem větší tuhostí a pevností než objemová forma stejného materiálu. Příkladem může být sklo. Při zatížení tabulky skla dojde k lomu při pouhých 20 MPa. Naproti tomu skelná vlákna se vyznačují několikanásobně vyšší pevností než klasická forma. Komerčně dostupná skelná vlákna dosahují pevnosti až 4800 MPa a vlákna připravená v laboratoři mají pevnost dokonce až 7000 MPa. Z tohoto srovnání je zřejmé, že použití vláknové formy materiálu se přímo nabízí, když chceme dosáhnout vyšší pevnosti struktur. Tento zdánlivý paradox, kdy stejný materiál v různých formách má různé mechanické vlastnosti, je možné vysvětlit. Objemové těleso je plné materiálových poruch ovlivňujících jeho chování. Čím menší je těleso, tím méně je poruch a tím lepší jsou mechanické vlastnosti. Navíc ve vlákně jsou krystaly zarovnány ve směru osy vlákna, což také pozitivně přispívá k chování materiálu. Vláknna jsou geometricky charakterizována jak velmi velkým poměrem délky ku průměru, tak i jejich průměrem, který je blízký rozměrům zrna [10].

Krátká vlákna jsou také používána jako nosný konstituent vláknového kompozitu. Jejich průměr je blízký průměru zrna, nicméně poměr délky k průměru vlákna je v řádu stovek. Krátká vlákna se také vyznačují mnohem lepšími mechanickými vlastnostmi než objemová tělesa. Dokonce mají lepší vlastnosti než dlouhá vlákna, protože jsou menší a tím pádem obsahují méně vad materiálu. Jejich malá délka je ale také jejich nevýhodou, protože přenos zatížení je vždy realizován pouze prostřednictvím interakce s matrixem. Kvůli tomu jsou maximální dosažitelné vlastnosti materiálu nižší, než u vláknových kompozitů s dlouhými vlákny [11].

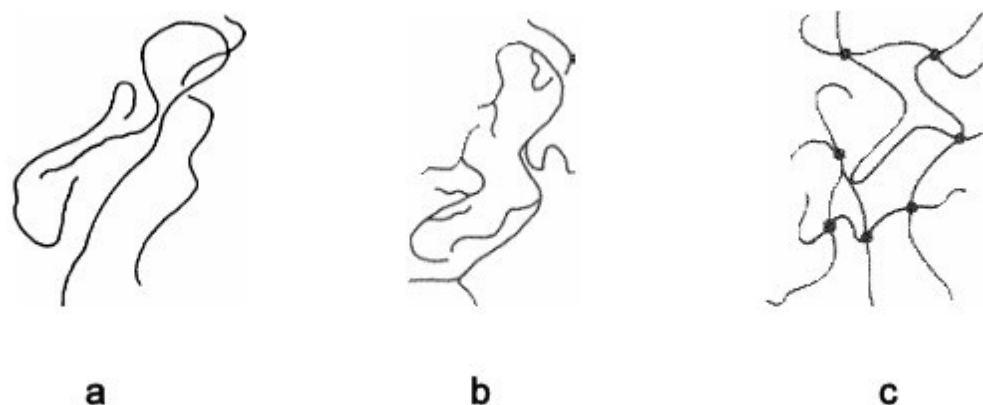
3.2.1.3. Matrice

Neméně důležitým prvkem vláknových kompozitů je i tzv. matrix neboli matrice. Je to materiál, který má za úkol spojit dohromady jednotlivá vlákna a tím vznikne kompozit, který se chová jako celek. Dalším úkolem matrixu je ochrana vláken, a to jak před poškozením, tak třeba i před korozí. U obou variant vláken matrix vytvoří a zachová požadovaný tvar komponenty. Matrice má často nižší tuhost a pevnost než vlákna. Spojením vláken a matrixu do jednoho celku je získán materiál s vyšší tuhostí a pevností, než mají samostatné konstituenty. Matricí může být polymer, kov, keramický materiál nebo karbon [10; 11].

3.2.1.4. Polymery

Polymery jsou látky, které se skládají z mnoha základních stavebních jednotek poskládaných určitým způsobem za sebe. Z hlediska řetězce je možné polymery rozdělit na lineární, rozvětvené a zesíťované. U lineárních řetězců jsou přítomny pouze jednotlivé řetězce bez rozvětvení. Rozvětvené polymery jsou již složitější. Jedna molekula se skládá z primárního řetězce, na který jsou různě připojeny vedlejší řetězce. Takováto molekula

tvorí trojrozměrnou strukturu. Posledním a nejsložitějším typem jsou polymery zesíťované. Ty jsou charakteristické tím, že jednotlivé řetězce jsou ve velké míře propojeny chemickými vazbami a neexistuje žádný primární řetězec. Lineární řetězce mají nejnižší pevnost i tuhost. Naproti tomu zesíťované řetězce mají největší pevnost i tuhost z polymerů. To je způsobeno propletenou molekulovou strukturou, která je tužší a pevnější než zbylé dvě varianty. Polymery lze také rozdělit do 3 tříd. Jsou to termoplasty, termosety a pryže. U termosetů se můžeme také setkat s názvy reaktoplasty, duromery nebo duroplasty. Termoplasty jsou polymery s rozvětvenými molekulami, nicméně zpravidla nedochází k propojení jednotlivých řetězců chemickými vazbami. Vazby mezi molekulami jsou pouze fyzikálního charakteru. Většinou mohou být opakovaně změkčeny zahřátím a následně znovu vytvrzeny pouhým zchlazením. Příkladem je například polyethyltereftalát (PET) nebo nylon. Pryže jsou polymery, které mají zesíťovanou molekulovou strukturu. Při teplotách výrazně nižších, než je pokojová teplota, mají pryže semikrystalickou strukturu, ale při pokojové teplotě se chovají pružně. Termosety jsou další třída polymerů. Tyto polymery jsou typické tím, že jejich molekulární struktura je silně zesíťovaná a řetězce jsou spojeny chemickými vazbami. Kvůli chemickým vazbám není možné polymer znovu roztavit a přetvořit do nového tvaru [10; 11; 12].



Obr. 7 – Molekulová struktura polymerů (a) lineárních, (b) rozvětvených a (c) zesíťovaných [12]

3.2.1.5. Další typy matic

Dalšími maticemi pro kompozity mohou být kovy. Předpřipravená vláknová struktura je zalita taveninou určitého kovu. Příklady takovýchto kovů jsou hliník, titan a slitina niklu a chromu. Výhodou těchto matic je jejich vyšší pevnost, tuhost a tvárnost. Oproti polymerům jsou kovy také odolnější proti vysokým teplotám. Cenou za lepší vlastnosti je ale vyšší hustota [10; 11].

Keramické matrice jsou další alternativou. Při výrobě kompozitu se tavenina spojí s náhodně orientovanými vlákny, nebo jsou vlákna orientována v důsledku míchání. Jiným přístupem je napaření matrice na předpřipravený systém vláken. Tyto matrice jsou křehké

a mají nízkou pevnost v tahu. Naproti tomu jsou ale odolné proti vysokým teplotám do 1650 °C [10; 11].

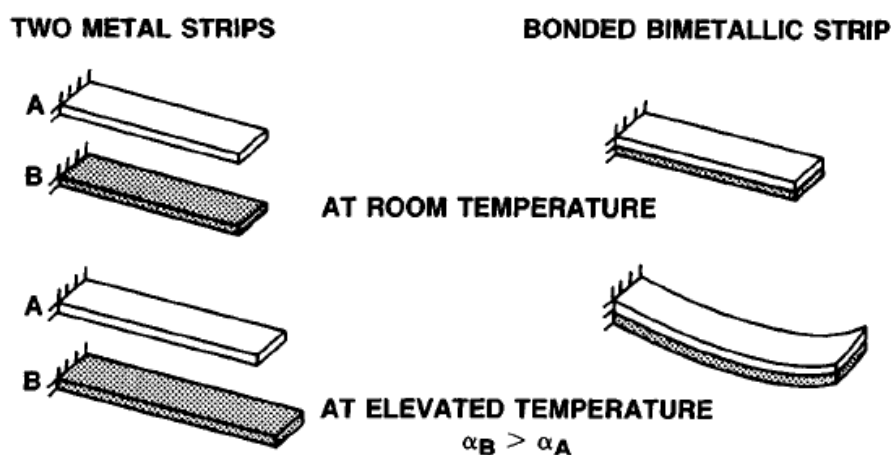
Další matricí může být karbon. V tomto případě je možné kompozit vyrobit napařením na existující systém vláken. Alternativně je možné karbonizovat tekutinu vlitou mezi vlákna, a to v inertní atmosféře za velmi vysokých teplot. Tento proces je potřeba opakovat několikrát, neboť při karbonizaci dochází ke zmenšení objemu. Tyto matrice se vyznačují velmi vysokou tepelnou odolností. Například kompozit s uhlíkovými vlákny v uhlíkové matrici je schopen odolat teplotám blízkým 2760 °C [10].

3.2.2. Vrstvené kompozity (Lamináty)

Lamináty jsou kompozitní materiály, které se skládají z nejméně dvou vrstev. Vrstvy mohou být z různých nebo i stejných materiálů s různou orientací. Vrstvy jsou k sobě přilepeny. Laminací může být dosaženo vyšší pevnosti, vyšší tuhosti, nižší hmotnosti, vyšší odolnosti proti korozi, vyšší odolnosti proti opotřebení, vyšší atraktivnosti výrobku, může být ovlivněna tepelná vodivost materiálu atd. Lamináty jsou bimetalové materiály, pokovované součásti, laminované sklo a jiné [10; 13].

3.2.2.1. Bimetalový kompozit

Bimetalové materiály jsou vytvořeny spojením dvou různých kovů, které mají zpravidla významně jinou teplotní roztažnost. Při zahřívání bimetalového materiálu dochází z rozdílné teplotní dilataci jednotlivých konstituentů a tím dojde k ohnutí, které je snadno předpověditelné. Díky této vlastnosti se bimetalové komponenty často používají v zařízeních pro měření teploty. Na Obr. 8 [10] je patrné chování bimetalového pásku při změně teploty. Pro názornost je také zobrazeno, jakým způsobem se chovají samostatné pásky kovu při změně teploty [10].



Obr. 8 – Chování bimetalového pásku při změně teploty [10]

3.2.2.2. Kompozity vzniklé pokovováním

Pokovování je další metoda výroby kompozitu. Příkladem může být nějaký kov, který má vysokou pevnost, nicméně jeho odolnost vůči korozi je malá. V tomto případě je možné přistoupit k pokovování kovem, který má dobrou odolnost vůči korozi. Kov pro pokovování se nemusí vyznačovat vysokou pevností, neboť silové účinky přenesou druhý materiál. Tímto postupem je získána součást, která má vysokou pevnost a zároveň je odolná proti korozi. Další možnou aplikací je hliníkový drát, který je potažený měděnou vrstvou. Oba kovy jsou dobré vodiče. Měď je lepším vodičem, neboť má nižší odpor, tudíž se při vedení elektrického proudu příliš nezahřívá a tím pádem nedochází ani k expanzi a kontrakci drátu. Nicméně měď je drahá. Hliník je naproti tomu levnější, ale při vedení proudu se zahřívá, což vede k častým změnám délky vlivem teploty. V extrémních případech může dojít až k únavovému lomu. Potažením hliníkového drátu měděnou vrstvou je získán drát, který je relativně levný a zároveň se jeho teplota při vedení proudu sníží. Navíc je takovýto drát lehčí, neboť hliník má mnohem nižší hustotu než měď [10].

3.2.2.3. Laminované sklo

Laminované sklo je také laminovaný kompozitní materiál. Jedná se o kompozit, který sestává ze dvou vrstev skla a jedné vrstvy plastu. Tento plast je nazýván polyvinyl butyral a je schopen se velmi hodně deformovat. Sklo jako takové je používáno pro svou průhlednost. Umisťuje se například do oken. V autech je rovněž používáno sklo, nicméně samostatně není vhodné. Sklo je křehký materiál, který se v případě dopravní nehody roztříští na velké množství ostrých fragmentů, které mohou poranit posádku. Proto se v automobilech používá právě laminované sklo, které se při kolizi sice roztříští, nicméně plastová fólie drží sklo stále pohromadě. Skleněné vrstvy naopak chrání plastovou fólii od poškrábání a dávají fólii oporu [10; 14].

3.2.3. Částicové kompozity

Tento druh kompozitního materiálu sestává z částic jednoho nebo více materiálů, které jsou rozptýleny do matrice z jiného materiálu. Částice mohou být kovové i nekovové povahy. Pro matrix také platí, že může být z kovu nebo z nekovového materiálu [10].

3.2.3.1. Kompozit s nekovovými částicemi a nekovovou matricí

Nejznámějším kompozitem tohoto typu je beton. Beton se skládá z částic písku a kamene, které jsou spojeny dohromady směsí cementu a vody, která chemicky reagovala a ztuhlala [15].

Použité částice mohou mít různý tvar jako třeba tvar vločky. Tento tvar má ve dvou směrech významnou tuhost a pevnost. Vlákna mají tyto vlastnosti pouze v jednom směru. Při orientaci vloček paralelně může být dosaženo větší hustoty než u vláknových kompozitů. Díky tomu je potřeba méně matrixu než v případě použití vláken. Teoreticky

mohou být tyto kompozity pevnější než vláknové, nicméně v reálných aplikacích tomu brání povrchové vady na vločkách. [10]

3.2.3.2. Kompozit s kovovými částicemi a nekovovou maticí

Tento typ částicových kompozitů se často vyskytuje v oblasti barev a nátěrů. Kovové vločky jsou rozptýleny v barvách a tím jim dodávají potřebné vlastnosti. Takovéto barvy poté mohou zvýšit elektrickou nebo tepelnou vodivost. Jiným příkladem kompozitu s kovovými částicemi a nekovovou maticí je pevné palivo do vesmírných raket. Palivo je tvořeno částicemi hliníku a okysličovadla, které jsou rozptýleny do pružné matrice z pryže [10; 16].

3.2.3.3. Kompozity s kovovými částicemi a kovovou maticí

Rozdíl tohoto typu kompozitu od slitin je v tom, že kovové částice se v kovové matici nerozpustí. Příkladem takovýchto částic jsou olovené částice. Při přimíchání do měděných slitin nebo ocelí se zlepší obrobitelnost materiálu. Některé kovy jsou křehké za pokojové teploty. Pro jejich opracování je potřeba je zahřát. Jedná se o kovy jako wolfram, chrom nebo molybden. Nicméně jejich částice je možné rozptýlit do houževnatého materiálu a následně vytvořit požadovaný tvar součásti. Kompozit, který vznikne tímto způsobem je tedy kujný a zároveň má lepší tepelné vlastnosti než samostatná matrice [10].

3.2.3.4. Kompozity s nekovovými částicemi a kovovou maticí

Nekovové částice mohou mít keramickou povahu. Při rozptýlení keramických částic v kovové matici se takovýmto kompozitům říká cermety. Existují dvě třídy cermetů, a to cermety na bázi oxidů a cermety na bázi karbidů [10].

Pro cermety na bázi oxidů platí, že částice mohou být nekovové a matrice kovová a naopak. Tyto materiály snášejí vysoké teploty a jsou odolné vůči opotřebení. Proto se tyto kompozity používají i při výrobě nástrojů [10; 17].

Cermety na bázi karbidů se obvykle skládají z částic karbidů wolframu, chromu, nebo titanu. Maticí používanou v tomto případě je většinou kobalt nebo nikl. Tyto materiály nacházejí uplatnění v teplotně náročných aplikacích, jako jsou součásti turbín, součásti spalovacích motorů (ventily) nebo v jaderném průmyslu. U reaktorů se tyto materiály používají pro palivové články nebo pro řídicí tyče [10; 17].

3.2.4. Kombinace kompozitních materiálů

Rozdělení kompozitů, které bylo prezentováno není dokonalé a můžeme se setkat s materiály, které je možné zařadit do více kategorií zároveň. Například vyztužený beton je možné považovat za částicový kompozit a zároveň za vláknový kompozit. Dalším příkladem kombinace je vláknový laminát, ve kterém má každá vrstva jinou orientaci

vláken. Různou orientací vláken ve vrstvách je možné optimalizovat materiál pro požadovanou aplikaci [10].

Vnitřní stavbou kompozitu i vzájemnou kombinací jednotlivých typů je možné ovlivňovat mechanické chování materiálu jako celku. Dělení je proto důležité i pro určení toho, jak se zkoumaný kompozit bude mechanicky projevovat. Tato problematika bude probírána dále.

4. Mechanické chování kompozitních materiálů

Kompozitní materiály se velmi často chovají jinak než konvenční materiály, jako jsou oceli, slitiny hliníku a jiné. Některé vlastnosti kompozitů jsou mírně jiné než u běžných materiálů a dají se použít klasické přístupy k práci s nimi. Jiné vlastnosti jsou zcela nové a je potřeba pro ně použít specifické pracovní postupy, aby mohly být uvažovány.

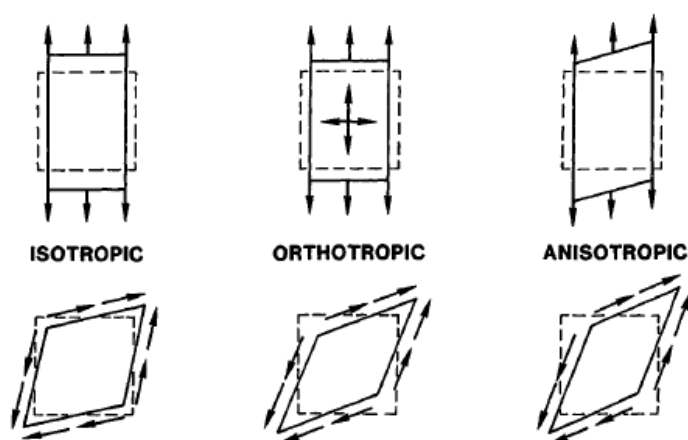
Nejčastější konstrukční materiály jsou homogenní a izotropní. U homogenního tělesa platí, že ve všech bodech má stejné vlastnosti, což znamená, že vlastnosti materiálu jsou nezávislé na pozici. Příkladem takové vlastnosti může být hustota standardních materiálů jako jsou oceli nebo jiné slitiny. Izotropní těleso je takové těleso, které má ve všech směrech stejné vlastnosti. Vlastnosti jsou tedy nezávislé na orientaci v bodě tělesa. Naproti tomu kompozity jsou často heterogenní. Co se týče směrovosti vlastností, kompozitní materiály mohou být izotropní, ortotropní, nebo anizotropní. Ortotropní materiály mají 3 hlavní vzájemně kolmé směry v daném bodě, ve kterých jsou různé vlastnosti. Pro anizotropní materiály platí, že v každém směru v daném bodě jsou jiné vlastnosti. Heterogenní těleso je charakterizováno tím, že nemá stejné vlastnosti ve všech bodech. U kompozitů je to způsobeno samotnou jejich podstatou. Jsou vytvořeny z nejméně dvou různých materiálů.

Díky heterogenní podstatě jsou kompozitní materiály studovány ze dvou hledisek. První hledisko se zabývá tím, jak se materiál chová v mikroskopickém měřítku. Je posuzována vzájemná interakce mezi konstituenty. Toto hledisko nazýváme mikromechanika materiálu. Druhé hledisko je zaměřeno na materiál jako celek. Kompozit je považován za homogenní a jeho vlastnosti jsou posuzovány z vnějšku. Toto hledisko nazýváme makromechanika materiálu. Následující kapitola je věnována právě tomuto hledisku [10].

4.1. Makromechanika kompozitů

Z pohledu návrhu komponent je důležitější makromechanika materiálu. Vnější chování materiálu je to, které se dá testovat a pomocí kterého se dá navrhnout součást tak, aby vyhovovala požadované aplikaci. V tom jsou kompozity velice výhodné ve srovnání s klasickými materiály. Klasické materiály mají stejné vlastnosti ve všech směrech, a to i v těch, ve kterých není potřeba. Kompozity jsou zpravidla navrženy tak, aby byly

nejsilnější ve smyslu orientace zatížení. Ostatní směry nejsou tak důležité a díky tomu dojde k úspoře hmotnosti. Pro charakteristiku materiálu je potřeba znát mechanické vlastnosti. Těmito vlastnosti jsou u izotropního lineárního materiálu Youngův modul a Poissonovo číslo. Jedná se pouze o dvě hodnoty, neboť ve všech směrech se materiál chová stejně. Transverzálně izotropní materiály mohou být popsány 5 parametry, ortotropní materiály jsou definovány 9 materiálovými konstantami. Počet potřebných materiálových vlastností roste s tím, do jaké míry je materiál anizotropní. Nejsložitějším případem je obecná anizotropie. Takovýto materiál nemá žádnou rovinu symetrie a v každém směru jsou jiné materiálové vlastnosti. Pro popsání anizotropního chování je potřeba znát 21 konstant. Anizotropie je specifická oproti izotropii i ortotropii tím, že každé zatížení vyvolá normálovou i smykovou deformaci. To se vůbec nestává u izotropního materiálu a ani u ortotropního v případě zatížení v hlavních směrech materiálu [10], [18].



Obr. 9 – Chování izotropního, ortotropního a anizotropního materiálu [10]

Standardně se mechanické vlastnosti materiálu určují pomocí tahové zkoušky. Tento přístup ale lze použít u materiálů, které jsou izotropní. U ortotropních materiálů je potřeba navíc realizovat i smykové zkoušky. Experimentálně určit vlastnosti anizotropního materiálu je podstatně složitější než tahová zkouška. Vzorky mají při zatížení sklon ke smýkání a také se ohýbají. Je potřeba zvolit jiný postup pro určení materiálových konstant. Než je blíže rozepsán postup vyšetřování materiálových konstant, je potřeba si vysvětlit pojmy jako objemový podíl a směšovací pravidlo. Pro představu byly prezentovány i vlastnosti samotných konstituentů, neboť na jejich vlastnostech závisí konečná povaha kompozitu. Následující kapitoly se budou tímto zabývat.

4.1.1. Objemový podíl vláken a matrixu

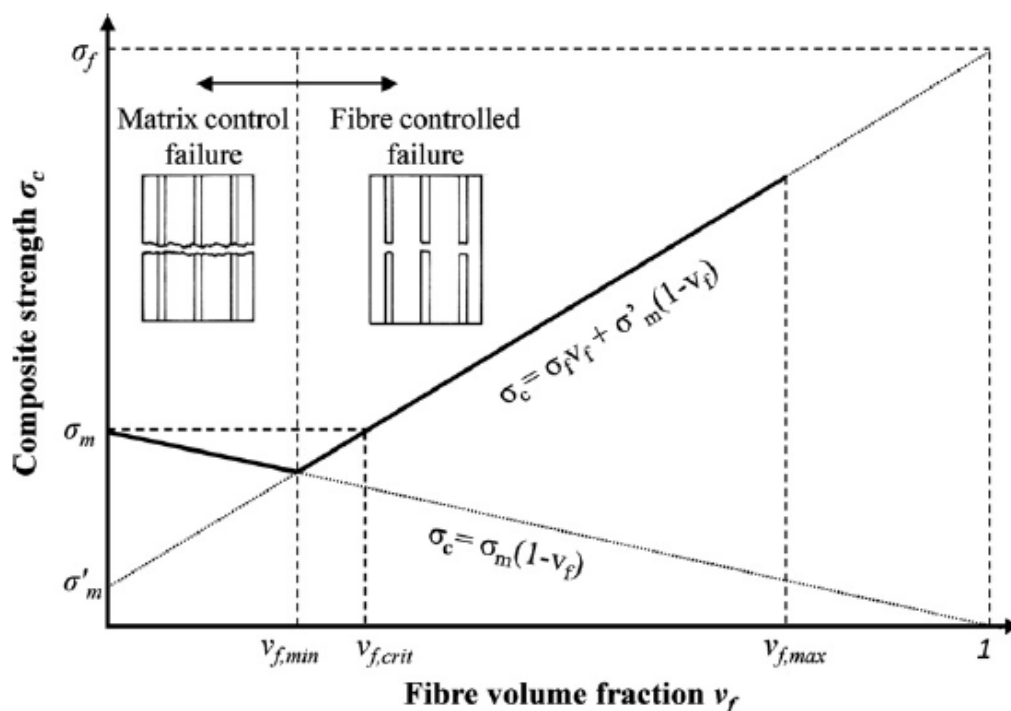
Klíčovou vlastností pro vláknové kompozity je také objemový podíl vláken v_f a matrixu v_m . Tímto údajem je vyjádřeno zastoupení vláken a matrixe v celkovém objemu materiálu. Objemový podíl konstituentů je jeden z parametrů, který je potřeba pro určení homogenizovaných mechanických vlastností kompozitu. Objemové podíly vláken a matrixu se určí podle vztahů (4.1) a (4.2) [19]:

$$v_f = \frac{V_f}{V_c} \quad (4.1)$$

$$v_m = \frac{V_m}{V_c} \quad (4.2)$$

kde V_f je objem vláken v kompozitu [m^3], V_m objem matrixu v kompozitu [m^3] a V_c je objem kompozitu [m^3].

Pro objemový podíl vláken platí určité hranice, které vymezují chování materiálu. První hranicí je minimální objemový podíl $v_{f,min}$. Když $v_f \leq v_{f,min}$, pak je pevnost materiálu dána pevností matrixu. Vlákná pouze způsobují koncentraci napětí a oslabují materiál. V důsledku toho je výsledná pevnost kompozitu nižší než pevnost samostatného matrixu ($\sigma_c < \sigma_m$). Druhou hranicí je kritický objemový podíl vláken $v_{f,krit}$. Jestliže platí, že $v_{f,min} < v_f < v_{f,krit}$, pak vlákna přenášejí zatížení a jejich selhání je rozhodující při namáhání kompozitu. Pevnost materiálu ale není dominantně dána vlákny. Poslední hranicí je maximální dosažitelný objemový podíl vláken $v_{f,max}$. Při platnosti $v_{f,krit} < v_f < v_{f,max}$ je dosaženo správně fungujícího kompozitu a většinu zatížení přenáší vlákna. Teoretický limit $v_{f,max}$ vyplývá z geometrie průřezu vláken. Protože je ale potřeba, aby matrix dokonale obklopil vlákna, prakticky je možné se dostat na hodnotu okolo $v_{f,max} = 0,6$. Na Obr. 10 je schéma znázorňující popisované chování [20].



Obr. 10 – Schéma závislosti mechanických vlastností kompozitu na objemovém podílu vláken [20]

Objemový podíl vláken a matrixe je důležitá informace, s jejíž pomocí se určují mnohé vlastnosti kompozitů. Těmito vlastnostmi jsou například tuhost, pevnost, hmotnost nebo

hustota. Ke stanovení těchto údajů je používáno tzv. směšovací pravidlo, které bude rozebráno později. Stanovení mechanických a fyzikálních vlastností kompozitů je klíčové pro následný návrh a další část práce se zaměří na tuto problematiku. Nejdříve bude probírána otázka vlastností konstituentů kompozitu.

4.1.2. Mechanické a fyzikální vlastnosti konstituentů kompozitů

Kompozity jsou složeny z dvou a více různých materiálů. Tyto konstituenty jsou často z konvenčních materiálů jako je ocel, hliník, či sklo. Forma těchto materiálů může podstatně ovlivnit jejich mechanické vlastnosti. Například vláknová forma je zpravidla pevnější než objemová forma. Této skutečnosti se využívá u vláknových kompozitů. V Tab. 2 je ukázáno, jakých hodnot materiálových parametrů může dosahovat vláknová forma konvenčních i modernějších materiálů, jako jsou uhlíková vlákna nebo skelná vlákna.

Vlákna	Hustota, ρ [$kg \cdot m^{-3}$]	Mez pevnosti, R_m [MPa]	$\frac{R_m}{\rho}$ [km]	Youngův modul, E [GPa]	$\frac{E}{\rho}$ [Mm]
Hliník	2700	620	24	73	2,8
Titan	4700	1900	41	115	2,5
Ocel	7800	4100	54	207	2,7
E-sklo	2540	3400	136	72	2,9
S-sklo	2480	4800	197	86	3,5
HM Karbon	1820	4610	258	455	25
HS Karbon	1790	7000	398	324	18

Tab. 2 – Přehled materiálových vlastností vláknových forem materiálů [10], [21], [22]

V Tab. 2 jsou také ukázány dva poměry. Jedním je poměr meze pevnosti R_m ku hustotě ρ a druhým je poměr Youngova modulu E ku hustotě ρ . Z hodnot těchto poměrů je vidět, že konvenční materiály jako ocel, hliník a titan mají horší vlastnosti, když je přihlédnuto k hmotnosti. Materiály jako uhlíková a skelná vlákna v těchto poměrech významně předčí konvenční materiály. Zvláště uhlíková vlákna jsou v tomto ohledu velice dobrá. Nicméně vlákna sama o sobě nejsou příliš praktická a ve většině aplikací je nejde použít. Je potřeba jim dát oporu, aby bylo možné s nimi zacházet podobně jako s klasickými materiály. Tuto oporu jim dodá matrix.

Matrix je klíčovou složkou kompozitů, protože dodává tvar a poskytuje vláknům oporu a ochranu. Matrix může být z polymerů, kovů, keramiky nebo uhlíku [10]. Pro vláknové kompozity se často využívají polymerní matrice, jako jsou například epoxidové pryskyřice. Typické materiálové vlastnosti epoxidových pryskyřic jsou řádově nižší než u vláken kompozitu. Hustota se pohybuje okolo $1200 kg \cdot m^{-3}$, Youngův modul nabývá okolo $2750 MPa$, pevnost v tahu a tlaku je v řádech desítek MPa. Pevnost v tahu se pohybuje v rozmezí $(20 \div 80) MPa$ a pevnost v tlaku je okolo $120 MPa$ [23; 24]. V případě, že jsou

použity konvenční materiály, jako jsou například kovy, jejich vlastnosti jsou rovny vlastnostem jejich objemových forem.

Když jsou známy vlastnosti jednotlivých konstituentů kompozitu, je možné vypočítat výsledné hodnoty, které jsou platné pro kompozit jako celek. Touto problematikou se bude text zabývat v následující části.

4.1.3. Směšovací pravidlo

Protože kompozity jsou z podstaty heterogenní, je potřeba homogenizovat materiálové vlastnosti. K tomuto účelu slouží tzv. směšovací pravidlo [25]. Díky tomuto pravidlu jsou získána data, která odpovídají chování kompozitu. Na heterogenní kompozit je tedy nahlíženo jako by byl homogenní. Klasicky se tímto způsobem získávají parametry jako Youngův modul ve směru vláken $E_{c,L}$ (rovnice (4.3)):

$$E_L = E_f \cdot v_f + E_m \cdot v_m \quad (4.3)$$

kde E_L je Youngův modul ve směru vláken kompozitu [MPa], E_f je Youngův modul vláken v podélném směru [MPa] a E_m je Youngův modul matrixu [MPa].

Meze pevnosti, hustota a jiné vlastnosti se určují obdobným způsobem.

4.1.4. Vlastnosti transverzálně izotropního materiálu

Určování vlastností transverzálně izotropního kompozitního materiálu je realizovatelné třemi způsoby. Materiálové parametry tedy mohou být stanoveny analyticky, experimentálně nebo numericky. Numerický přístup spočívá ve vymodelování elementu kompozitu. V elementu jsou přítomny oba konstituenty a jsou definovány jejich vlastnosti. Následně je tento element zatížen. Z odezvy modelu se poté určují vlastnosti materiálu. Dále bude podrobněji rozebrán analytický i experimentální přístup.

4.1.4.1. Elastické konstanty (analytický přístup)

Analytický přístup je alternativou toho numerického. Při tomto přístupu je často využíváno směšovacího pravidla. Příkladem je Youngův modul ve směru vláken E_L . Rovnice (4.3) definuje výpočet tohoto parametru. Tento vztah je odvozen z rovnice (4.4), která je směšovacím pravidlem pro napětí v kompozitu. Při dosazení Hookova zákona pro 1D napjatost a vykrácení poměrných deformací je následně získána rovnice (4.3). Přetvoření je možné vykrátit, protože jsou si rovny.

$$\sigma_c = v_f \cdot \sigma_f + v_m \cdot \sigma_m \quad (4.4)$$

Směšovací pravidlo se používá také k určení μ_{LT} , což je Poissonovo číslo pro závislost mezi podélnou a příčnou deformací. V tomto případě je vycházeno ze vztahu (4.5), který

vyjadřuje, že kontrakce tloušťky kompozitu při podélném namáhání je rovna dílčím kontrakcím jednotlivých konstituentů kompozitu.

$$\Delta t_c = \Delta t_f + \Delta t_m \quad (4.5)$$

kde Δt_c je kontrakce kompozitu [m], Δt_f je kontrakce vláken [m] a Δt_m je kontrakce matrixu [m]. Kontrakce jsou poté vyjádřeny a rovnice se získá tvar:

$$t_c \cdot \varepsilon_{Tc} = t_f \cdot \varepsilon_{Tf} + t_m \cdot \varepsilon_{Tm} \quad (4.6)$$

kde $t_{c,f,m}$ jsou tloušťky [m] a $\varepsilon_{Tc,f,m}$ jsou přetvoření konstituentů v příčném směru. Poté se do rovnice dosadí s využitím rovnice pro výpočet Poissonova čísla a zkrátí se podélná přetvoření $\varepsilon_{L,c,f,m}$, protože jsou shodná. Nakonec je ze shodných poměrů tlouštěk a objemů odvozeno, že poměr tlouštěk se roven objemovým podílům. Tím bylo získáno směšovací pravidlo pro μ_{LT} .

$$\mu_{LT} = v_f \cdot \mu_f + v_m \cdot \mu_m \quad (4.7)$$

kde $\mu_{f,m}$ jsou Poissonova čísla konstituentů [-].

Pro určení příčného Youngova modulu E_T a modulu ve smyku G_{LT} je používán Halpin – Tsai model. Výpočty parametrů poté vypadají následovně podle [26]:

$$E_T = E_m \cdot \frac{1 + \eta \cdot \xi \cdot v_f}{1 - \eta \cdot v_f} \quad (4.8)$$

$$G_{LT} = G_m \cdot \frac{1 + \eta \cdot \xi \cdot v_f}{1 - \eta \cdot v_f} \quad (4.9)$$

kde E_m a G_m jsou moduly pružnosti matrixu [MPa], ξ je součinitel zohledňující uspořádání vláken (pro čtvercové uspořádání $\xi = 2$ [26]) a η je součinitel, který se určí pro E_T ze vztahu (4.10) [26] a pro G_{LT} se určí ze vztahu (4.11) [26].

$$\eta = \frac{\frac{E_f}{E_m} - 1}{\frac{E_f}{E_m} + \xi} \quad (4.10)$$

$$\eta = \frac{\frac{G_f}{G_m} - 1}{\frac{G_f}{G_m} + \xi} \quad (4.11)$$

kde $G_{f,m}$ jsou moduly pružnosti ve smyku vláken a matrixu [MPa].

Pro určení Poissonova čísla pro příčnou rovinu $\mu_{TT'}$ je používán tzv. Clyne model. Nicméně hledání podkladů na toto téma je obtížné a nebyl nalezen dostatečně věrohodný

pramen. Proto zde není tento model představen. Nicméně jedna informace zde bude uvedena. Poissonovo číslo $\mu_{TT'}$ může podle Clyne modelu překročit hodnotu 0,5 a její teoretický limit je 1.

4.1.4.2. Elastické konstanty (experimentální přístup)

Kromě numerického a analytického přístupu je možné získat elastické konstanty také prostřednictvím experimentu. Získávání vlastností pomocí zkoušení má několik výhod. Experimenty jsou snadno realizovatelné, ovšem pouze v případě, že je k dispozici vhodné vybavení. Další výhodou je zohlednění odchylek výrobního procesu. Tím je získán skutečný obraz chování zkoušeného materiálu. Nevýhodou je nutnost existence vzorku.

4.1.5. Kritéria selhání kompozitu

Při namáhání kompozitních materiálů může dojít k překročení pevnostních limitů materiálu. Selhání kompozitu se ale liší od selhání konvenčních materiálů, a má 3 fáze. V první fázi nedochází k poškození a tato fáze se nazývá elastická fáze. V druhé fázi dochází ke vzniku poškození a v poslední fázi dojde k šíření poškození. Poslední fáze se nazývá „fáze po selhání“. Příkladem těchto kritérií jsou Tsai Wu kritérium a kritérium maximálních napětí, které budou použity v této práci [27].

4.1.5.1. Kritérium maximálních napětí

Kritérium maximálních napětí je jednoduché kritérium. Jsou posuzována napětí v hlavních směrech jednotlivých vrstev a v případě, že napětí překročí předepsanou pevnost, dojde k selhání vrstvy. Funkce kritéria selhání má tvar:

$$f = \max\left(\left|\frac{\sigma_1}{X_{c/t}}\right|, \left|\frac{\sigma_2}{Y_{c/t}}\right|, \left|\frac{\sigma_3}{Z_{c/t}}\right|, \left|\frac{\tau_{12}}{S}\right|, \left|\frac{\tau_{13}}{R}\right|, \left|\frac{\tau_{23}}{Q}\right|\right) \quad (4.12)$$

kde $\sigma_{1,2,3}$ jsou hlavní napětí [MPa], $\tau_{12,13,23}$ smyková napětí a $X_{c/t}, Y_{c/t}, Z_{c/t}$ jsou pevnosti v tahu nebo tlaku a S, R, Q jsou pevnosti materiálu pro smyk [28].

4.1.5.2. Tsai Wu kritérium

Kritérium Tsai Wu spadá do skupiny kvadratických kritérií selhání. Kvadratická kritéria používají pro posouzení všech komponentů napětí jednu rovnici. Tato rovnice má obecný tvar:

$$f = F_i \cdot \sigma_i + F_{ij} \cdot \sigma_i \cdot \sigma_j + F_{ijk} \cdot \sigma_i \cdot \sigma_j \cdot \sigma_k \quad (4.13)$$

kde F_i, F_{ij}, F_{ijk} jsou koeficienty reprezentující materiálovou pevnost a $\sigma_{i,j,k}$ jsou složky napětí [27].

Při zjednodušení pro rovinnou napjatost platí, že $\sigma_3 = 0$. Funkční předpis kritéria má poté tvar:

$$f = F_{11} \cdot \sigma_1^2 + F_{22} \cdot \sigma_2^2 + F_{66} \cdot \tau_{12}^2 + 2 \cdot F_{12} \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 + F_1 \cdot \sigma_1 + F_2 \sigma_2 \quad (4.14)$$

Klíčové je určení koeficientů F_i a F_{ij} rovnice (4.14). Pro Tsai Wu kritérium při rovinné napjatosti se tyto parametry určují následovně [28; 11]:

$$F_{11} = \frac{1}{X_t \cdot X_c} \quad (4.15)$$

$$F_{22} = \frac{1}{Y_t \cdot Y_c} \quad (4.16)$$

$$F_1 = \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c} \quad (4.17)$$

$$F_2 = \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c} \quad (4.18)$$

$$F_{55} = \frac{1}{S^2} \quad (4.19)$$

Poté má Tsai Wu kritérium tvar:

$$f = \frac{\sigma_1^2}{X_t \cdot X_c} + \frac{\sigma_2^2}{Y_t \cdot Y_c} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} + \left(\frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c} \right) \cdot \sigma_1 + \left(\frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c} \right) \cdot \sigma_2 + 2 \cdot F_{12} \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 \quad (4.20)$$

Koeficient F_{12} nelze určit z uniaxiální takové zkoušky a je stanovován z biaxiální tahové zkoušky. V praxi je proto často uvažován jako bezrozměrný interakční koeficient a má tvar [27; 28]:

$$2 \cdot F_{12} = (-1) \cdot \frac{1}{\sqrt{X_t \cdot X_c \cdot Y_t \cdot Y_c}} \quad (4.21)$$

Tímto byla řešersní část práce ukončena a následuje praktická část.

5. Formulace problematiky a cílů práce

Zadáním diplomové práce je navržení a pevnostní kontrola kompozitní hlavně minometu. Důvodem úpravy hlavně pomocí kompozitu je snaha o úsporu hmotnosti, případně zvýšení pracovních tlaků. Než je minomet poprvé použit, je provedena operace, která se nazývá autofretáž. Tato úprava má za cíl vytvoření plastické deformace na vnitřním průměru hlavně. Po odlehčení součásti dojde ke vzniku tlakových napětí právě na vnitřním průměru hlavně. Tento proces bude první zátěžný stav, kterému bude posuzovaná součást vystavena. Následně bude také provedena simulace výstřelu. Chování struktury během výstřelu bude posuzováno z hlediska napěťově-deformačního i z hlediska únavy. První simulace bude provedena na ocelové hlavni. Po simulaci na původní geometrie budou navrženy úpravy s použitím kompozitního materiálu. Po provedení simulace autofretáže a výstřelu na kompozitní hlavni bude přistoupeno ke zhodnocení možné úspory hmotnosti případně zvýšení pracovních tlaků.

Stanovené cíle práce:

- Sestavení výpočtového modelu ocelové hlavně
Pro analýzu bude potřeba specifikovat tvar součásti a následně vytvořit výpočtový model, který dostatečně přesně popíše zkoumanou problematiku.
- Simulace autofretáže a výstřelu na ocelové hlavni
Simulované chování hlavně bude potřeba vyhodnotit a následně stanovit podmínky, které musí minomet zvládnout.
- Navržení úprav původní geometrie s použitím kompozitního materiálu
Navržené úpravy musí vyhovět minimálně stejným podmínkám, kterým vyhověla původní konstrukce minometu.
- Zhodnocení úspory hmotnosti a případného zvýšení pracovních tlaků

6. Sestavení výpočtového modelu

Tvorba výpočtového modelu má několik bodů, které je potřeba zpracovat. Patří mezi ně specifikace geometrie, materiálů, tvorba sítě, definování okrajových podmínek. Dále je také potřeba rozhodnout, zda je použita teorie malých, nebo velkých deformací a pro časově závislé úlohy je důležité určit optimální časový krok. Dále se práce bude zabývat touto problematikou.

6.1. Geometrie

Vzhledem k absenci technické dokumentace posuzovaného minometu 120 KRH 92 je potřeba přistoupit k odvození rozměrů hlavně z volně přístupných zdrojů [4], [29]. Pomocí tzv. reverzního inženýrství budou přibližně určeny hodnoty potřebných rozměrů. Výsledná geometrie bude aproximací skutečného tvaru.

Z označení zbraně 120 KRH 92 je možné vyčíst dva údaje, a to ráži hlavně a rok výroby. Ráže hlavně je tedy 120 mm. Rok výroby není pro potřeby této práce podstatný. Více již ze samotného označení nelze vyčíst. V Tab. 3 [4], [29] jsou vypsány všechny potřebné hodnoty, které byly dohledatelné. Materiál také není znám, ale klasické celokovové minomety se zpravidla vyrábějí z oceli, proto je v Tab. 3 [4], [29] zvolena hustota oceli.

Ráže d_r [mm]	Délka hlavně L_{hl} [mm]	Hmotnost hlavně m_{hl} [kg]	Hustota oceli ρ_{oceli} [kg · m ⁻³]
120	2000	100	7800

Tab. 3 – Volně dohledatelné parametry minometu 120 KRH 92 [4], [29]

Dalším krokem bude odvození tloušťky stěny hlavně. Ta bude určena ze vztahu hmotnosti, objemu a hustoty. Zjednodušeně si je možné představit, že hlaveň je pouze trubka se zaslepením na jednom konci. Je tedy potřeba vyjádřit objem tohoto tělesa v závislosti na tloušťce stěny t_s . Stěna zaslepení bude tlustá stejně jako stěna hlavně. Objem hlavně V_{hl} je tedy vyjádřen rovnicí (6.1)

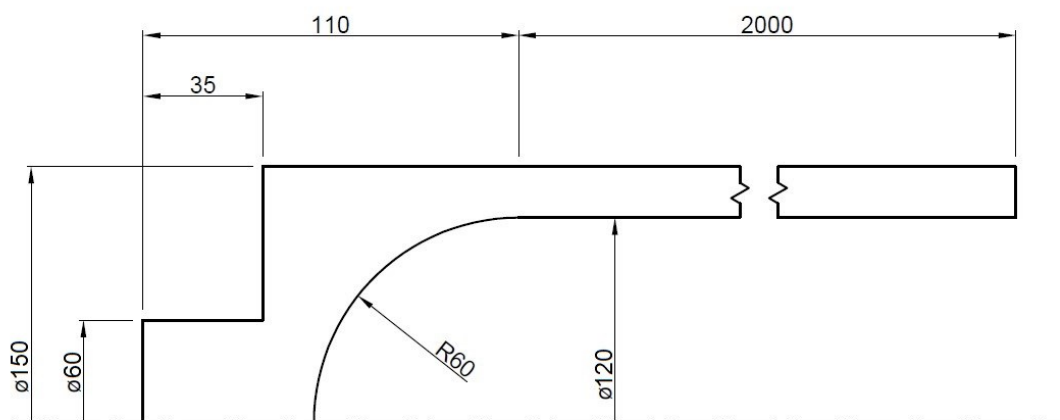
$$V_{hl} = \frac{\pi}{4} \cdot [(d_r + 2 \cdot t_s)^2 \cdot L_{hl} + (d_r + 2 \cdot t_s)^2 \cdot t_s] \quad (6.1)$$

Poté je vyjádřený objem dosazen do rovnice (6.2), která popisuje závislost hmotnosti na hustotě a objemu. Z této rovnice se následně určí přibližná tloušťka stěny hlavně.

$$m_{hl} = V_{hl} \cdot \rho_{oceli} \quad (6.2)$$

Je vypočten odhad tloušťka stěny $t_{s,odhad} = 14,8 \text{ mm}$. Z praktických důvodů je zvoleno, že uvažovaná tloušťka hlavně je rovna $t_s = 15 \text{ mm}$.

Finální tvar geometrie neodpovídá přesně skutečnosti, nicméně je odhadnut podle [1] a [30], kde jsou fotografické a schématické předlohy. Základem je tloušťka stěny, která slouží jako měřítko. Schéma odvozené geometrie je na Obr. 11.



Obr. 11 – Schéma odvozené geometrie hlavě

6.2. Materiál

6.2.1. Volba materiálu

Jak již bylo zmíněno, minomety se vyrábějí z oceli. Jelikož jsou informace o použitém materiálu nedostupné, bylo potřeba zvolit vhodný materiál. Zdrojem informací o materiálu se stala publikace [31]. Byla zvolena vysokopevnostní ocel MS 300. V Tab. 4 jsou vypsány vlastnosti zvolené oceli, a to ve dvou tepelných úpravách.

	Žíhaná 1h/820°C	Stařená 3h/480°C
Smluvní mez pevnosti, R_m [MPa]	1000	1916
Mez kluzu, $R_{p0,2}$ [MPa]	951	1868
Kontrakce průřezu při přetržení [%]	76	49
Skutečná poměrná deformace při přetržení, ε_f [%]	1,43	0,71
Skutečné napětí při přetržení, σ_f [MPa]	1489	2275
Youngův modul, E [MPa]	179263	179263
Exponent zpevnění materiálu, n [–]	0,03	0,02
Tvrdost podle Rockwella, HRC [–]	31,6	52,8

Tab. 4 – Přehled mechanických vlastností vysokopevnostní oceli 300 [31]

V této práci bude použita ocel stařená 3h/480°C, protože má lepší mechanické vlastnosti. Vojenské aplikace jsou obecně velice náročné, a proto vyžadují co nejlepší vlastnosti materiálu.

6.2.2. Závislost materiálových vlastností na rychlosti zatěžování

Specifikace zatížení bude probírána později, nicméně rychlost zatížení může být pro chování materiálu klíčové. Proto je potřeba určit, zda je nutné tento jev zohlednit, nebo je možno vliv rychlosti zatěžování zanedbat. Podle [32] je možné posoudit, kdy je nutné zohlednit rychlost zatěžování. Během analýzy budou probíhat dva zátěžné jevy. Jedním je autofretáž a druhým je výstřel. Z [32] vyplývá, že pro posouzení této problematiky je potřeba znát rychlost poměrné deformace $\dot{\epsilon}$. V Tab. 5 jsou hodnoty $\dot{\epsilon}_{max}$ pro oba typy zatížení.

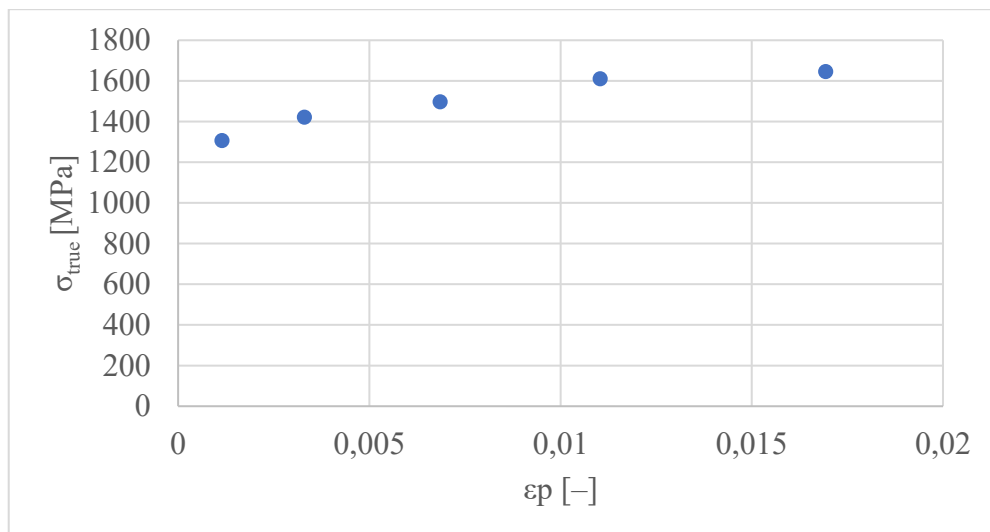
	$\dot{\epsilon}_{max} [s^{-1}]$
Autofretáž	$3,9 \cdot 10^{-2}$
Výstřel	$1,5 \cdot 10^0$

Tab. 5 – Hodnoty $\dot{\epsilon}_{max}$ pro oba typy zatížení

Podle [32] jsou určené hodnoty stále v oblasti, která dovoluje zanedbání rychlosti zatěžování. Přestože se u výstřelu jedná o hraniční hodnotu, je možné k tomuto zjednodušení přistoupit a dále nebude uvažován vliv rychlosti zatěžování na chování materiálu.

6.2.3. Model plasticity

Pro analýzu bude také potřeba nastavit plastické chování materiálu. V [31] jsou k dispozici data potřebná pro nastavení modelu plasticity. Jedná se o cyklické deformační křivky, respektive o vrcholy hysterezních křivek. Těmito body bude následně proložena křivka aproximující cyklickou deformační křivku oceli.



Obr. 12 – Vrcholy ustálených hysterezních smyček pro vysokopevnostní ocel 300 [31]

Pro popsání plastického chování materiálu se používají tzv. modely plasticity. Tyto modely se dělí na izotropní a kinematické, případně jejich kombinace. Izotropní modely se používají pro monotónní zatěžování a nejsou schopny podchytit Bauschingerův efekt.

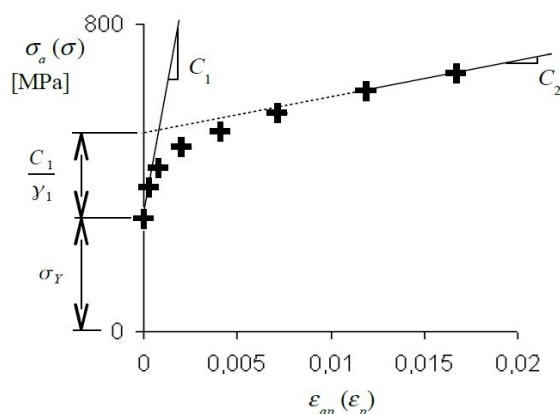
Kinematické modely jsou naproti tomu vhodné i pro cyklické analýzy, protože zohledňují Bauschingerův efekt.

Pro potřeby této práce bude použit Chaboche kinematický model plasticity. Pro fitování modelu na data materiálu byla použita Levenberg-Marquardtova metoda [33]. Vzhledem k datům, které jsou k dispozici bude použit Chaboche model se dvěma kinematickými větvemi. Při použití Levenberg-Marquardtovy metody je potřeba stanovit počáteční odhad, který byl odvozen z materiálových dat. Rovnice (6.3) popisuje zvolený Chaboche model s dvěma kinematickými větvemi pro aproximaci cyklické deformační křivky.

$$\sigma_a = \sigma_Y + \frac{C_1}{\gamma_1} \cdot \tanh(\gamma_1 \cdot \varepsilon_{ap}) + C_2 \cdot \varepsilon_{ap} \quad (6.3)$$

kde σ_a je amplituda napětí [MPa], σ_Y je mez kluzu [MPa], ε_{ap} je amplituda plastické poměrné deformace [-], $C_{1,2}$ materiálové konstanty [MPa], γ_1 je materiálová konstanta [-]

Na Obr. 13 je znázorněn význam jednotlivých materiálových konstant z rovnice (6.3), které popisují Chabocheho model plasticity.

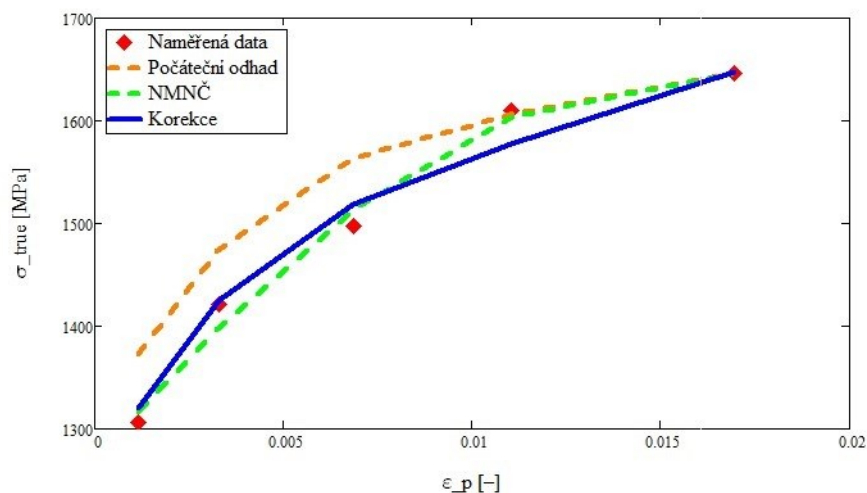


Obr. 13 – Schéma znázorňující význam materiálových konstant $C_{1,2}$ a γ_1 [34]

V Tab. 6 jsou porovnány hodnoty odhadu, fitu L.–M. metody a následné manuální korekce. K manuální korekci muselo dojít, neboť konstanta C_2 získaná z L.–M. metody byla záporná, což je v případě plasticity nesmysl.

	Odhad	NMNČ	Korekce
σ_Y	1305	1270	1250
C_1	53600	52690	50600
γ_1	225	76	250
C_2	6060	-12804	11500

Tab. 6 – Porovnání konstant Chabocheho modelu pro jednotlivé fáze fitování

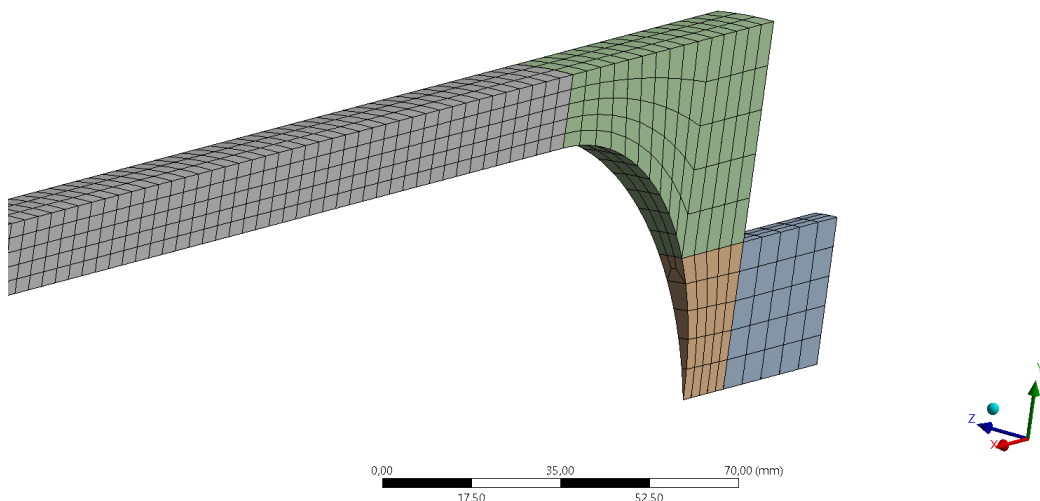


Obr. 14 – Znáznornění procesu fitování cyklické deformační

Finální aproximace je křivka „Korekce“. Na Obr. 14 je znázorněn rozdíl mezi odhadem, výsledkem L.–M. metody a následné manuální korekce.

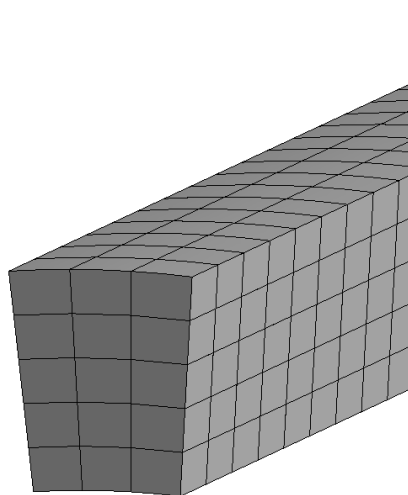
6.3. Konečnoprvková síť

Geometrii tvoří 10° výřez z celé součásti. Dobře vytvořená síť pro osově souměrnou úlohu by měla být pravidelná. Jelikož je posuzovaný tvar odhad, nejdůležitější částí je dvoumetrová dutá hlaveň. Zaslepení je nejméně přesné a je důležité hlavně kvůli uchycení modelu. Na Obr. 15 je ukázáno, jaká síť byla vytvořena pro danou geometrii. Síť je vytvořena z kvadratických elementů SOLID186.

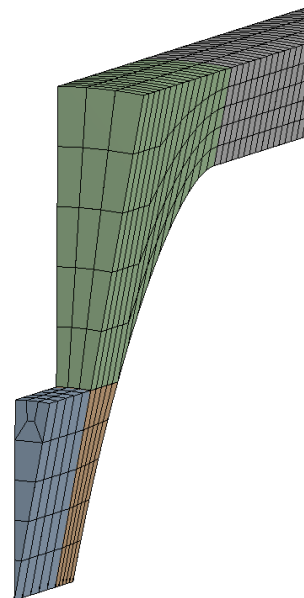


Obr. 15 – Vizualizace vytvořené sítě

Na Obr. 16 je pohled na průřez duté části hlavě. Na šířku jsou aplikovány 3 elementy a na tloušťku stěny 5 elementů. V podélném směru je nastaveno rozdělení hran na 5 mm. Obr. 17 spolu s Obr. 15 ukazuje, jak je koncipována síť na závěrném konci. Všechna nastavení velikostí elementů mají nastaveno chování „Hard“. Tím se docílí, že síť se vytvoří přesně podle specifikovaného nastavení.



Obr. 16 – Síť v podélném směru hlavně

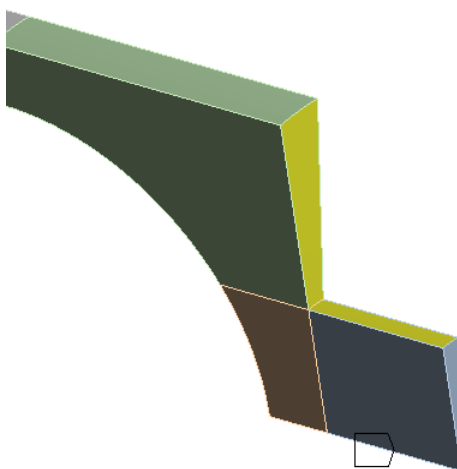


Obr. 17 – Navazující síť na slepém konci hlavně

6.4. Okrajové podmínky

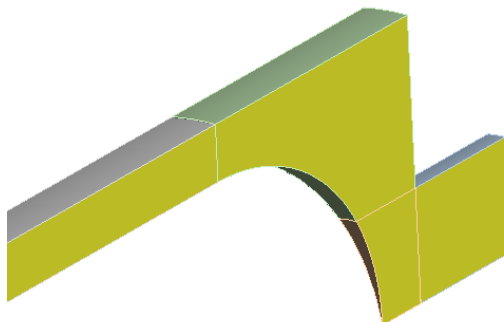
6.4.1. Uchycení modelu

První okrajové podmínky, které je potřeba aplikovat jsou vazby. Nejdříve je nutné model uchytit na jedné pozici. K tomuto účelu bylo použito vazby „Remote Displacement“. Nastavení chování vazby bylo přepnuto na „Rigid“, takže geometrie okrajové podmínky se nedeformuje. Tímto je nahrazen šroub, který u skutečného minometu upevňuje tělo zbraně k podstavci, viz. Obr. 18. Byly zakázány všechny posuvy i rotace. Řídící bod leží na souřadnicích $[-92,5 \text{ mm}; 0 \text{ mm}; 0 \text{ mm}]$ a leží na ose součásti.



Obr. 18 – Znáznornění ploch s okrajovou podmínkou a řídicího bodu

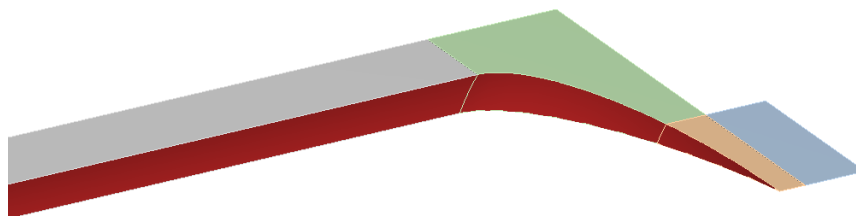
Protože se jedná o výřez z celé geometrie, je potřeba určit roviny symetrie. Symetrie byla realizována okrajovou podmínkou „Frictionless support“ a byl zamezen pohyb v kolmém směru na rovinu symetrie. Na Obr. 19 jsou ukázány plochy, které patří do jedné roviny symetrie. Druhá rovina symetrie je na opačné straně modelu.



Obr. 19 – Specifikace roviny symetrie

6.4.2. Definice zatížení

Během analýzy se uplatňují dvě zatížení a každé v jiném časovém úseku. Nejdříve dojde k autofretáži a následně k výstřelu. Obě tato zatížení jsou definována jako tlak a působí na stejných plochách geometrie, a to na vnitřním průměru hlavně. Na Obr. 20 je vizualizováno, kde zatížení působí.



Obr. 20 – Plochy s aplikovaným tlakovým zatížením

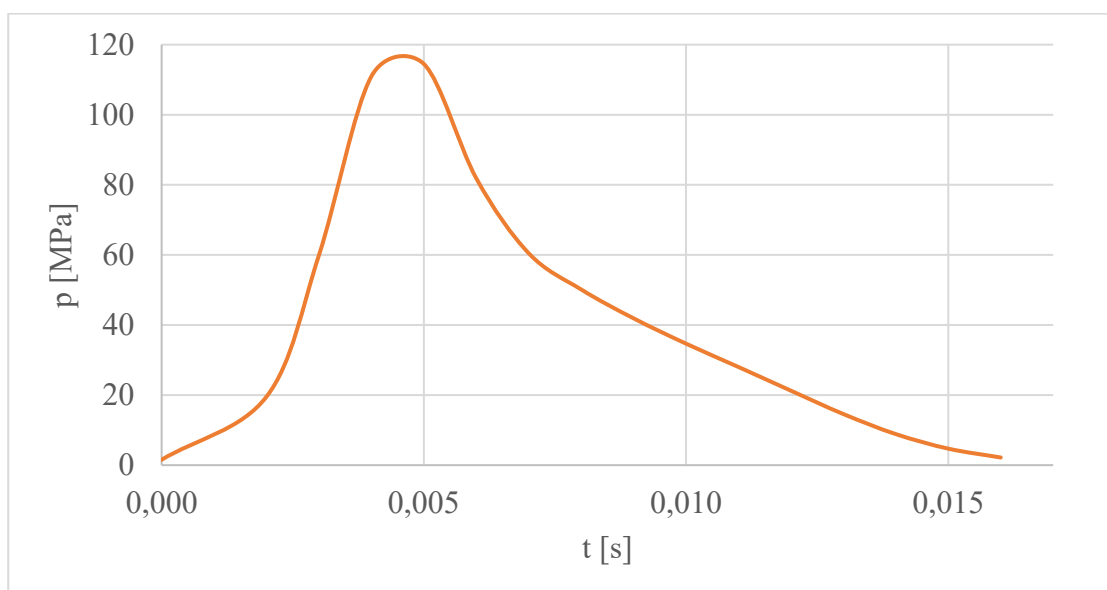
Důležitý je způsob nastavení zatížení. Celková doba analýzy je 2,03 s a je rozdělena na dva časové intervaly. V kapitole 6.5 jsou důvody tohoto nastavení vysvětleny. První interval je pro autofretáž a jeho časové rozpětí je 0–2 s. Druhý interval je pro výstřel a má časové rozpětí 2–2,03s. V případě autofretáže byly zadány 3 hodnoty tlaků. V Tab. 7 jsou tyto hodnoty vypsány. Maximální hodnota tlaku při autofretáži byla stanovena tak, aby byla vyvozená plastická deformace pod 1 %.

Čas [s]	Tlak [MPa]
0	0
1	340
2	0

Tab. 7 – Zadání tlaku pro autofretáž

V druhém časovém intervalu byl zadán tlak odpovídající časovému průběhu výstřelu. Data průběhu výstřelu jsou převzata z [30]. Tlak byl zadán pomocí funkce, která byla naitována na převzatá data. Opět byla použita Levenberg-Marquardtova metoda. Aproximační funkce je převzata z [35]. Na Obr. 21 je znázorněna aproximovaná tlaková funkce. Předpis tlakové funkce je vidět v rovnici (6.4):

$$p(t) = 77,08 \cdot e^{-\left(\frac{t-4,327 \cdot 10^{-3}}{1,558 \cdot 10^{-3}}\right)^2} + 48,921 \cdot e^{-\left(\frac{t-5,793 \cdot 10^{-3}}{3,101 \cdot 10^{-3}}\right)^2} + 26,907 \cdot e^{-\left(\frac{t-0,01}{3,787 \cdot 10^{-3}}\right)^2} \quad (6.4)$$



Obr. 21 – Tlaková funkce výstřelu

6.5. Nastavení analýzy a konvergence časového kroku

Aby bylo dosaženo správných výsledků, je potřeba optimálně nastavit analýzu. Protože se jedná o časově závislou simulaci, je nastaven transientní typ analýzy. Dále je použita teorie velkých deformací, protože v úloze se vyskytuje plasticita a díky tomuto nastavení je docíleno přesnějších výsledků. Navíc je nutné specifikovat časový interval výpočtu. Proces autofretáže má délku trvání 2 s, a proto je první časový úsek nastaven s délkou 2 s. Následně je proveden výstřel, který má dobu trvání přibližně 0,02 s. Délka druhého úseku je proto nastavena na hodnotu 0,03 s. Hodnota je mírně vyšší, aby byla krátká prodleva mezi zatíženími. Konečný čas analýzy je 2,03 s.

Velice důležité je také nastavení časového kroku. Příliš hrubý časový krok by znamenal, že nebude správně popsáno chování materiálu a ani časový průběh zatížení. Naopak příliš jemný krok sice zajišťuje správnost výsledku, nicméně za cenu výpočetní a časové náročnosti výpočtu. Je proto potřeba určit takový časový krok, který dostatečně přesně popíše chování struktury a průběh zatížení. Cílem je získat největší možný časový krok při zachování dostatečně přesných výsledků. Tento proces se nazývá „analýza konvergence časového kroku“. Konvergenci je nutné udělat pro každý časový úsek zvlášť.

Pro obě zatížení je sledovaná veličina ekvivalentní napětí (von Mises) $\sigma_{eq,HMH}$, respektive její časový průběh. Napětí je sledováno v jednom uzlu, aby byly výsledky srovnatelné. Porovnávají jsou následně obsahy ploch pod vykreslenou křivkou. Kritériem konvergence je 1% rozdíl obsahů ploch pod křivkou mezi dvěma po sobě následujícími kroky v pořadí. Tab. 8 ukazuje proces konvergence pro autofretáž. Tab. 9 popisuje proces konvergence pro výstřel.

Krok [s]	1	0,5	0,25	0,125	0,0625
Obsah plochy	1557	1507	1484	1458	1453
Změna [%]	---	-3,2	-1,5	-1,8	-0,4

Tab. 8 – Konvergence časového kroku pro autofretáž

Krok [s]	0,01	0,005	0,0025	0,00125
Obsah plochy	1,79	4	3,43	3,43
Změna [%]	---	123	-14	-0,07

Tab. 9 – Konvergence časového kroku pro výstřel

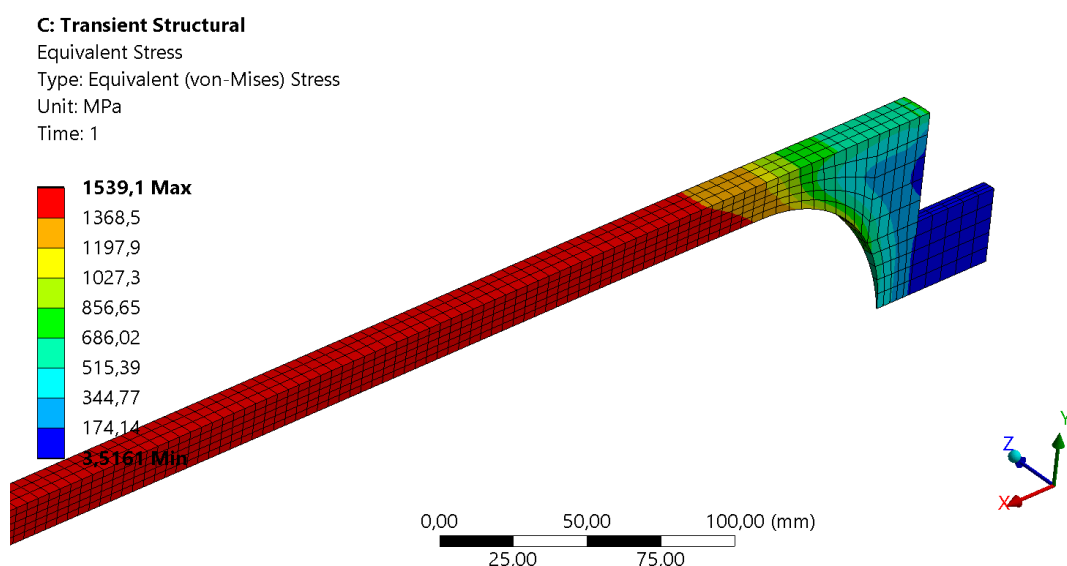
Z analýzy konvergence časového kroku vychází, že pro autofretáž je vhodným časovým krokem 0,0625 s. Pro výstřel je vhodný časový krok 0,00125 s.

Tímto končí fáze sestavení výpočtového modelu a je možné přistoupit k samotné simulaci chování minometu. V následující části práce bude analyzováno přetvoření a napětí v ocelové hlavni 120 mm minometu.

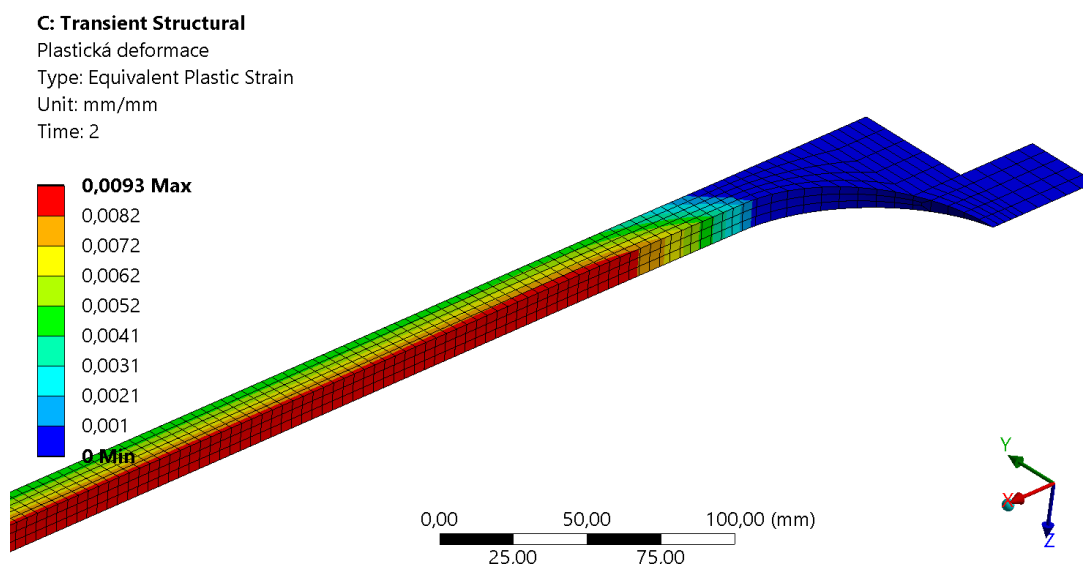
7. Simulace výstřelu z ocelové hlavní minometu

V této části bude analyzováno přetvoření a napětí v ocelové hlavní minometu. Všechna nastavení potřebná pro správné provedení analýzy byla probírána v kapitole 6. Simulace má dva časové intervaly, které se liší zatížením. Výsledky pro výstřel jsou závislé na míře plastické deformace vyvozené při autofretáži. Je proto potřeba nejdříve provést autofretáž a až následně výstřel.

7.1. Vyhodnocení autofretáže ocelové hlavní

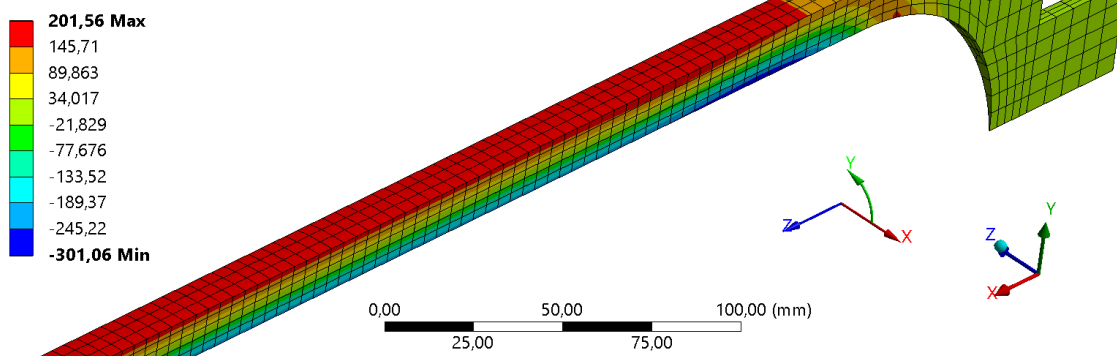


Obr. 22 – Ekvivalentní napětí na ocelové hlavní při autofretáži v čase 1 s



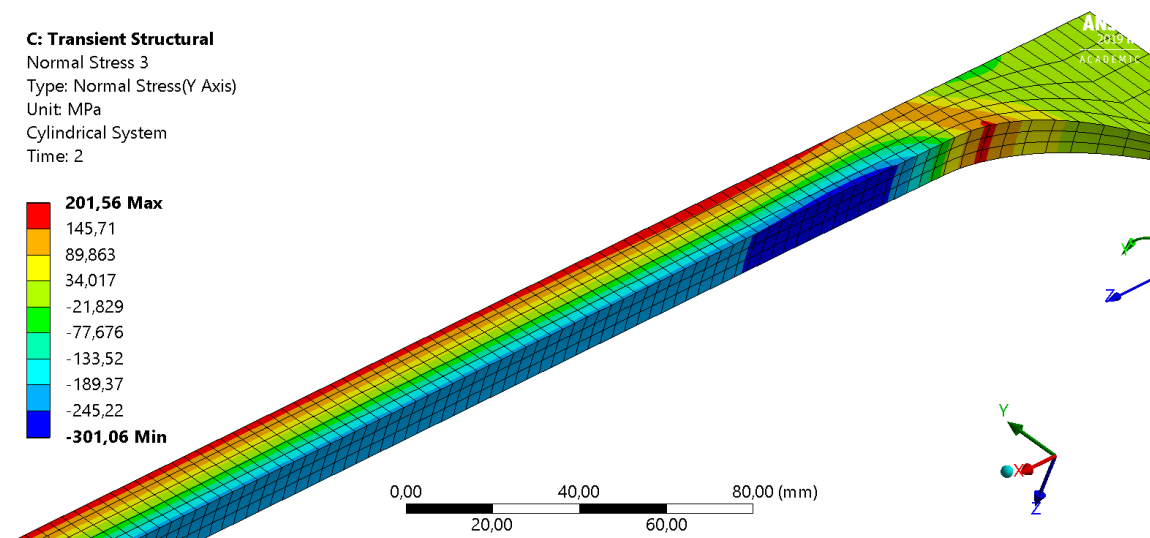
Obr. 23 – Ekvivalentní plastické přetvoření na ocelové hlavní po autofretáži v čase 2 s

C: Transient Structural
 Normal Stress 3
 Type: Normal Stress(Y Axis)
 Unit: MPa
 Cylindrical System
 Time: 2



Obr. 24 – Zbytková obvodové napětí po autofretáži ocelové hlavně v čase 2 s (pohled shora)

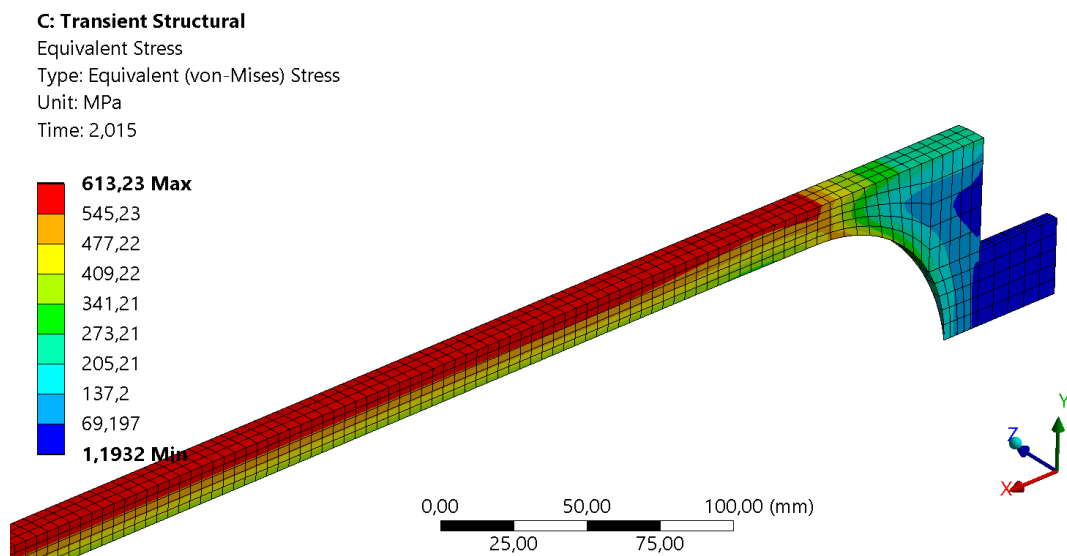
C: Transient Structural
 Normal Stress 3
 Type: Normal Stress(Y Axis)
 Unit: MPa
 Cylindrical System
 Time: 2



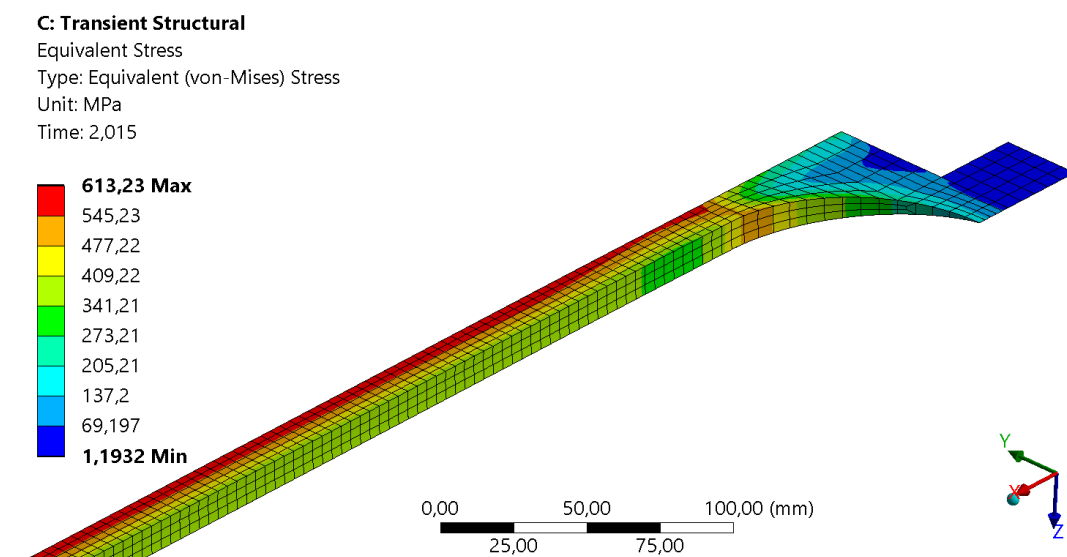
Obr. 25 – Zbytková obvodové napětí po autofretáži ocelové hlavně v čase 2 s (pohled zdola)

Na Obr. 22 je vidět rozložení ekvivalentního napětí 2 s. V tomto čase na model působí největší autofretážní tlak o velikosti 340 MPa. Ekvivalentní napětí přesáhlo výrazně mez kluzu prakticky po celé duté délce hlavně. Na Obr. 23 je vidět velikost ekvivalentního plastického přetvoření. Maximální plastické přetvoření má hodnotu 0,93 % a vyskytuje se na vnitřním průměru hlavně. Po odlehčení jsou na Obr. 24 a Obr. 25 vidět zbytková obvodová napětí. Maximální hodnota má velikost 201 MPa a je lokalizovaná na vnější průměr hlavně. Na vnitřním průměru hlavně jsou generována tlaková napětí o minimální velikosti -301 MPa, a to v blízkosti závěru hlavně. Většina vnitřní plochy je potom stlačována napětím do -245 MPa.

7.2. Vyhodnocení výstřelu z ocelové hlavně



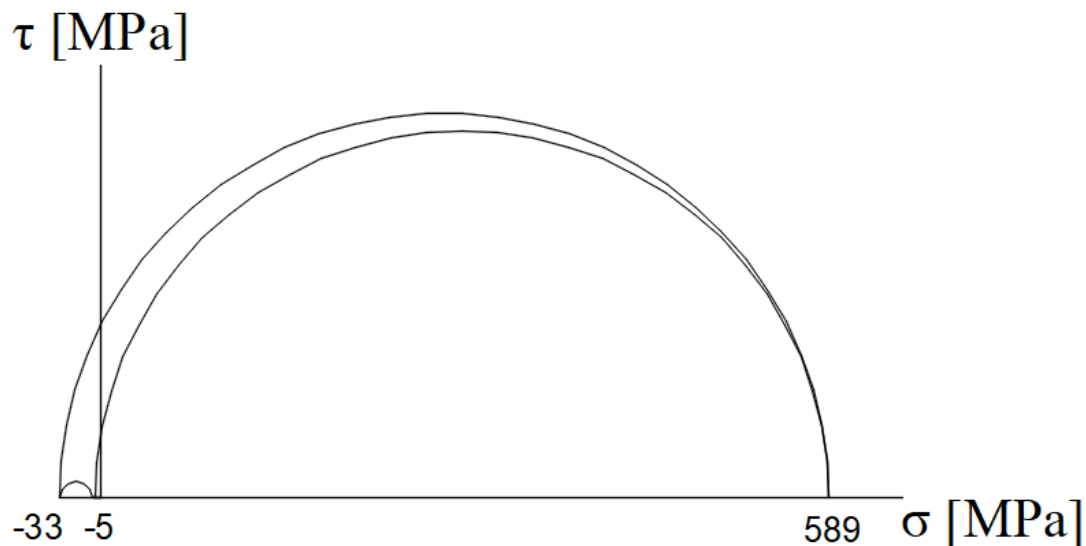
Obr. 26 – Ekvivalentní napětí na ocelové hlavni při výstřelu v čase 2,015 s (pohled shora)



Obr. 27 – Ekvivalentní napětí na ocelové hlavni při výstřelu v čase 2,015 s (pohled zdola)

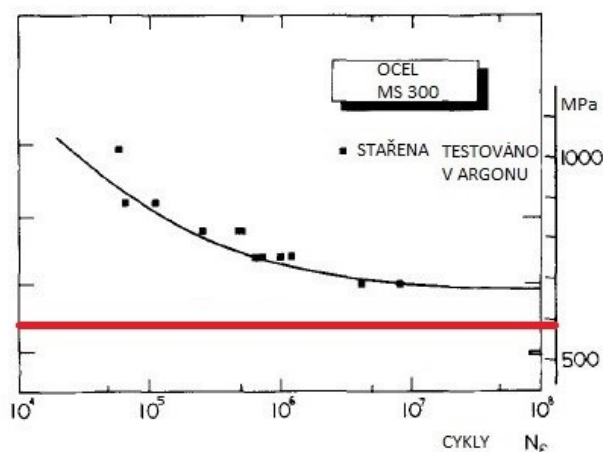
Na Obr. 26 a Obr. 27 je vykresleno napětí na hlavni během výstřelu, respektive v čase 2,015 s, kdy působí největší tlak. Maximální napětí je na vnějším průměru hlavně a má velikost 613 MPa. Kritickým místem je celý vnější průměr, kde se vyskytuje maximální ekvivalentní napětí. Na Obr. 26 je tato kritická oblast na vnějším povrchu znázorněna červenou barvou. Pro posouzení stavu napjatosti je možné vybrat kterýkoliv uzel z této oblasti.

Pro posouzení stavu napjatosti bude použita Mohrova kružnice. V případě, že bude napjatost výrazně orientovaná jedním směrem, bude možné vyhodnotit únavu z Wöhlerových křivek pro jednoosou napjatost. V opačném případě není možné použít toto zjednodušení.



Obr. 28 – Mohrova kružnice pro kritické místo na ocelové hlavni

Z Mohrovy kružnice na Obr. 28 je možné vyčíst, že napjatost v kritickém místě má silně dominantní obvodový směr. Díky tomuto zjištění je možné zhodnotit únavu materiálu podle Wöhlerovy křivky pro jednoosou napjatost. Za amplitudu napětí bude považována amplituda obvodového napětí o hodnotě 589 MPa.



Obr. 29 – Vyhodnocení únavy pro ocelovou hlavěň

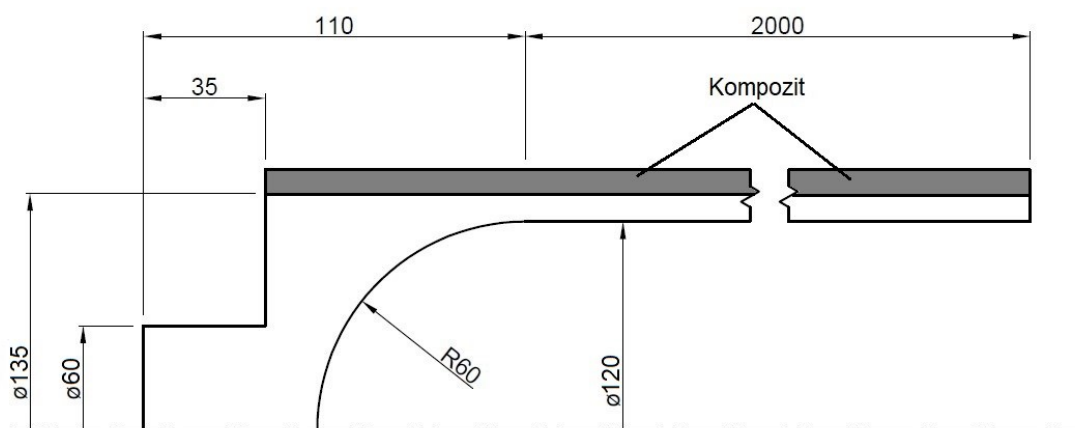
Na Obr. 29 je červenou čarou vyznačena uvažovaná amplituda zatížení způsobeného výstřelem. Je patrné, že amplituda se pohybuje pod Wöhlerovou křivkou, je proto možné prohlásit, že hlavěň je dimenzována na nekonečný počet cyklů.

8. Návrh kompozitní hlavě

Kompozitní hlavě by měla být lehčí než původní ocelová a také by měla minimálně zachovat napěťovou odezvu součásti na zatížení během výstřelu. Kompozitní hlavě tedy musí projít autofretáží a následně vyhovět limitům, které nastavila simulace ocelové hlavě. Pro snížení hmotnosti je potřeba snížit tloušťku ocelové stěny. Následující část se bude zabývat touto úpravou.

8.1. Geometrie

Geometrie původního minometu byla upravena zmenšením vnějšího průměru. Tloušťka stěny byla snížena na polovinu a to na 7,5 mm. Tato volba se může během optimalizace měnit podle toho, jak se bude konstrukce chovat. Tloušťka kompozitu bude probírána v následujících částech práce. Na Obr. 30 je schéma upravené geometrie.



Obr. 30 – Schéma geometrie kompozitní hlavě

Než je možné přistoupit k analýze modelu s kompozitním materiálem, je potřeba tento materiál specifikovat. V další kapitole bude tomuto tématu věnována pozornost.

8.2. Návrh laminy kompozitního materiálu

8.2.1. Volba konstituentů kompozitu

Podle zadání má být použit jednosměrový dlouhovláknový kompozit. Proto je potřeba specifikovat materiál vláken a materiál matrixu. Z Tab. 2 bylo vyvozeno, že nejlepší materiál pro vlákna je karbon. Byla proto zvolena uhlíková vlákna. Pro matrix byla zvolena epoxydová pryskyřice. Epoxydové pryskyřice mají dobrou smáčivost karbonových vláken, proto byla učiněna tato volba. Díky dobré smáčivosti dojde k optimálnímu vyplnění prostoru mezi vlákny.

Na trhu je velká nabídka karbonových vláken. Byla zvolena uhlíková vlákna PYROFIL™ od firmy Mitsubishi Chemical. Byl zvolen materiál s označením HR 40 12P ze série HM uhlíkových vláken. V Tab. 10 jsou vypsány vlastnosti uhlíkových vláken podle [21]. Další potřebné vlastnosti, které nejsou k dispozici od výrobce, budou převzaty z [36].

Typ vlákna	Průměr vlákna, d_f [μm]	Mez pevnosti vláken, σ_f [MPa]	Youngův modul, $E_{f,L}$ [MPa]	Prodloužení do prasknutí, $\varepsilon_{f,ult}$ [%]	Hustota, ρ [$g \cdot cm^{-3}$]
HR 40 12P	5	4610	425000	1,1	1,85

Tab. 10 – Materiálové vlastnosti uhlíkových vláken podle [21]

$E_{f,T}$ [MPa]	G_{LT} [MPa]	G_{TT} [MPa]	μ_{LT} [MPa]	μ_{TT} [MPa]
22,4	22,1	8,3	0,3	0,35

Tab. 11 – Materiálové vlastnosti uhlíkových vláken podle [36]

Správná volba matrixu byla klíčová, aby bylo dosaženo kvalitního designu kompozitního materiálu. Byla zvolena epoxydová pryskyřice od firmy Fibre Glast, řady „Systém 1000 Laminating Epoxy Resin“. Technická dokumentace je k prostudování na [37]. V Tab. 12 jsou vypsány vlastnosti zvolené epoxydové pryskyřice.

Typ	Hustota, ρ [$g \cdot cm^{-3}$]	Mez pevnosti, $\sigma_{ult,m}$ [MPa]	Prodloužení do prasknutí, $\varepsilon_{m,ult}$ [%]	Youngův modul, E_m [MPa]	Teplota skelného přechodu, T_g [$^{\circ}C$]
1000 w/ 1025	1,11	257	30,6	17749	77

Tab. 12 – Materiálové vlastnosti epoxydové pryskyřice podle [37]

Když byly zvoleny konstituenty kompozitu, je možné pokračovat dále v designu materiálu. V následující části práce bude vytvořena lamina kompozitního materiálu ze zvolených konstituentů.

8.2.2. Tvorba laminy kompozitu

Výhodou jednosměrových dlouhvláknových kompozitů je možnost spojení více vrstev do jednoho celku. Každá vrstva může být libovolně orientována, tím je možné vytvořit materiál na míru aplikaci. Nejdříve je potřeba nadefinovat vlastnosti jedné homogenizované vrstvy. K tomu byl využit modul v ANSYS Workbench, který se nazývá Material Designer. V prostředí tohoto modulu je potřeba nastavit několik parametrů. Je potřeba definovat, který materiál je vlákno a který je matrix, uspořádání vláken v matrixu, průměr vláken, objemový podíl vláken. Pak je nutné specifikovat, jaké vlastnosti jsou požadovány jako výsledek. V Tab. 13 jsou vypsané potřebné údaje pro určení elastických konstant kompozitu. Tab. 14 obsahuje vypočtené vlastnosti laminy kompozitu.

Vlákná	Matrix	Uspořádání vláken	Objemový podíl vláken, v_f [-]	Průměr vláken, d_f [μm]
Uhlíková vlákna	Epoxydová pryskyřice	Čtvercové	0,5	5

Tab. 13 – Potřebné údaje pro Material Designer

E_x [MPa]	$E_{y,z}$ [MPa]	$G_{xy} = G_{xz}$ [MPa]	G_{yz} [MPa]	$\mu_{xy} = \mu_{xz}$ [-]	μ_{yz} [-]	ρ [$g \cdot cm^{-3}$]
221355	21234	11495	7349	0,33	0,44	1,48

Tab. 14 – Elastické konstanty hustota homogenizované laminy kompozitu

8.2.3. Stanovení mezí pevnosti kompozitu

Když byly určeny elastické vlastnosti kompozitu, je potřeba určit limitní hodnoty zatížení pro tento materiál. Tyto hodnoty se určí z elastických vlastností kompozitu a z vlastností použitých konstituentů. Potřebnými mezemi jsou tahové a tlakové meze pevnosti a také meze pevnosti ve smyku. Dále budou postupně počítány jednotlivé limitující hodnoty.

8.2.3.1. Pevnost v tahu ve směru vláken

Výpočet pevnosti v tahu ve směru vláken $\sigma_{ult,c,t,L}$. Rovnice (8.1) popisuje potřebnou závislost vycházející ze směšovacího pravidla.

$$\sigma_{ult,c,t,L} = v_f \cdot \sigma_{ult,f} + v_m \cdot \sigma_{ult,m} \quad (8.1)$$

kde v_f a v_m jsou objemové podíly vláken a matrixu [-] a $\sigma_{ult,f}$ a $\sigma_{ult,m}$ jsou meze pevnosti v tahu pro vlákna a matrix [MPa].

$$\sigma_{ult,c,t,L} = 2433 \text{ MPa} \quad (8.2)$$

8.2.3.2. Pevnost v tlaku ve směru vláken

Mez pevnost v tlaku ve směru vláken $\sigma_{ult,c,c,L}$ se určí z rovnice (8.3) [38], která stanovuje kritickou hodnotu pro vzpěr vláken kompozitu.

$$\sigma_{ult,c,c,L} = \frac{G_{xy}}{1,5 + 12 \cdot \left(\frac{6}{\pi}\right)^2 \cdot \frac{G_{xy}}{E_x}} \quad (8.3)$$

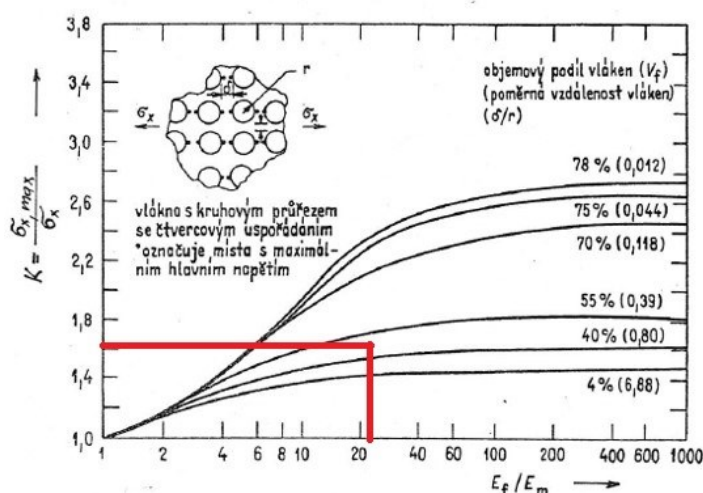
$$\sigma_{ult,c,c,L} = 3046 \text{ MPa} \quad (8.4)$$

8.2.3.3. Pevnost v tahu v příčném směru vláken

Dále bylo nutné stanovit pevnosti kompozitu v kolmém směru na vlákna. Rovnice (8.5) [39] stanovuje pevnost v tahu v kolmém směru na vlákna.

$$\sigma_{ult,c,t,T} = \frac{\sigma_{ult,m}}{K} \quad (8.5)$$

kde K je součinitel koncentrace napětí [–], který se určí podle Obr. 31. Součinitel má tedy hodnotu $K \sim 1,6$.



Obr. 31 – Stanovení součinitele koncentrace napětí K [39]

8.2.3.4. Pevnost v tlaku v příčném směru vláken

$$\sigma_{ult,c,t,T} = 160 \text{ MPa} \quad (8.6)$$

Pevnost materiálu v tlaku v kolmém směru na vlákna $\sigma_{ult,c,c,T}$ má vazbu na $\sigma_{ult,c,t,T}$. Mez pevnosti v tlaku je větší nebo rovna mezi pevnosti v tahu. V rovnici (8.7) je zvolena hodnota 160 MPa. Volba této hodnoty je na straně bezpečnosti.

$$\sigma_{ult,c,c,T} = 160 \text{ MPa} \quad (8.7)$$

8.2.3.5. Pevnost ve smyku

Poslední potřebné pevnosti jsou pevnosti ve smyku $\tau_{ult,c}$. Nejdříve je nutné určit, maximální zkos $\gamma_{ult,c}$, který se vypočte podle vztahu (8.8) [11; 40].

$$\gamma_{ult,c} = \gamma_{m,ult} \cdot \left[\frac{d_f}{s} \cdot \frac{G_m}{G_f} + \left(1 - \frac{d_f}{s} \right) \right] \quad (8.8)$$

kde $\gamma_{ult,c,xy}$ je zkos v rovině xy a jeho hodnota je $\gamma_{m,ult} = 2 \cdot \varepsilon_{m,ult}$, s je vzdálenost mezi vlákny [mm], G_m je modul pružnosti matrixu ve smyku [MPa] a G_f je modul pružnosti vláken ve smyku [MPa]. Nejdříve je potřeba určit vzdálenost mezi vlákny s, která se určí vztahem (8.9) [26]:

$$s = \sqrt{\frac{\pi \cdot d_f}{4 \cdot v_f}} \quad (8.9)$$

Vzdálenost mezi vlákny s je $s = 6,27 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$. V Tab. 15 jsou vypsány maximální hodnoty zkosu pro všechny směry. Pro určení meze pevnosti ve smyku bude použita menší hodnota $\gamma_{ult,c,xy}$, tato volba je na straně bezpečnosti.

$\gamma_{ult,c,xy} = \gamma_{ult,c,xz} [-]$	$\gamma_{ult,c,yz} [-]$
0,029	0,078

Tab. 15 – Hodnoty maximálního zkosu pro kompozitní materiál

Nyní je možné určit meze pevnosti ve smyku pro všechny směry. Rovnice (8.10) je obecnou rovnicí pro určení meze pevnosti ve smyku. V Tab. 16 jsou vypsány vypočítané hodnoty mezí pevnosti ve smyku.

$$\tau_{ult,c} = \gamma_{ult,c} \cdot G \quad (8.10)$$

$\tau_{ult,c,xy} = \tau_{ult,c,xz} [\text{MPa}]$	$\tau_{ult,c,yz} [\text{MPa}]$
333	213

Tab. 16 – Meze pevnosti kompozitu ve smyku pro všechny směry

Tímto bylo plně specifikováno chování jedné laminy. Další část práce se bude zabývat designem laminátu, který bude tvořit celek kompozitního materiálu.

8.3. Návrh kompozitní hlavně

Původní geometrie minometu byla upravena stylem, který byl prezentován na Obr. 30 v kapitole 8.1. Tloušťka kompozitní vrstvy nebyla specifikována a k tomu bude přistoupeno v této části práce. Geometrií kompozitu je pouze plocha. Kompozit byl tedy vymodelován ze skořepinových elementů SHELL181. Tímto se do modelu při větších tloušťkách vnáší jistá chyba. Pro potřeby optimalizace návrhu je ale chyba akceptovatelná. K návrhu kompozitního laminátu byl použit ANSYS modul ACP (Pre), který slouží k modelování kompozitů a je dobrým nástrojem pro vytváření vrstvených kompozitů. V tomto modulu bylo také definováno, že jedna lamina má tloušťku 0,5 mm. Orientace vláken je pro každou vrstvu specifikována úhlem natočení vzhledem k ose x. Osa x je totožná s osou hlavně.

Pro lamináty se používá určitý způsob zápisu, který bude použit k uvedení orientace vláken v jednotlivých návrzích. Jako příklad poslouží kompozit z 10 vrstev, jehož vlákna jsou orientována v sekvenci $90^\circ, 90^\circ, -45^\circ, 45^\circ, 0^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 90^\circ, 90^\circ$. Takový laminát je možné zapsat: $[90_2/\pm 45/\bar{0}]_s$. Tento zápis bude použit k definici kompozitu v jednotlivých návrzích.

Nastavení analýzy a výpočtového modelu bylo shodné s nastaveními platnými pro ocelovou hlavěň. K vyhodnocení byl použit stejný přístup, jako u ocelové hlavěně. Navíc byl samostatně posuzován kompozit, zda nedošlo k jeho selhání. Pro posouzení kompozitu byla použita dvě kritéria. Kritérium Tsai Wu a Kritérium maximálního napětí. Během návrhu byla jednotlivá kritéria vyhodnocena pro celou vrstvu dohromady. Vyhodnocení kritérií bylo provedeno v čase 1 s. V tomto čase působí na hlavěň největší zatížení, proto byl zvolen právě tento čas. Když komponenta vyhoví v čase 1 s, pak vyhovuje v každém časovém okamžiku analýzy.

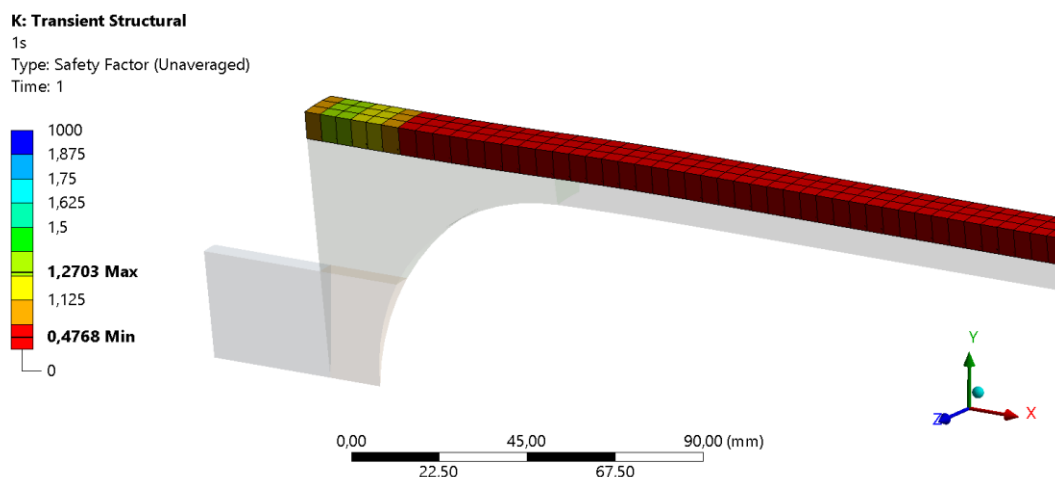
Podle zadání byly vytvořeny dva návrhy. Návrhy se liší orientací vláken v jednotlivých vrstvách. V následující části budou tyto návrhy představeny a bude ukázán proces postupného návrhu obou variant.

8.3.1. Návrh 1

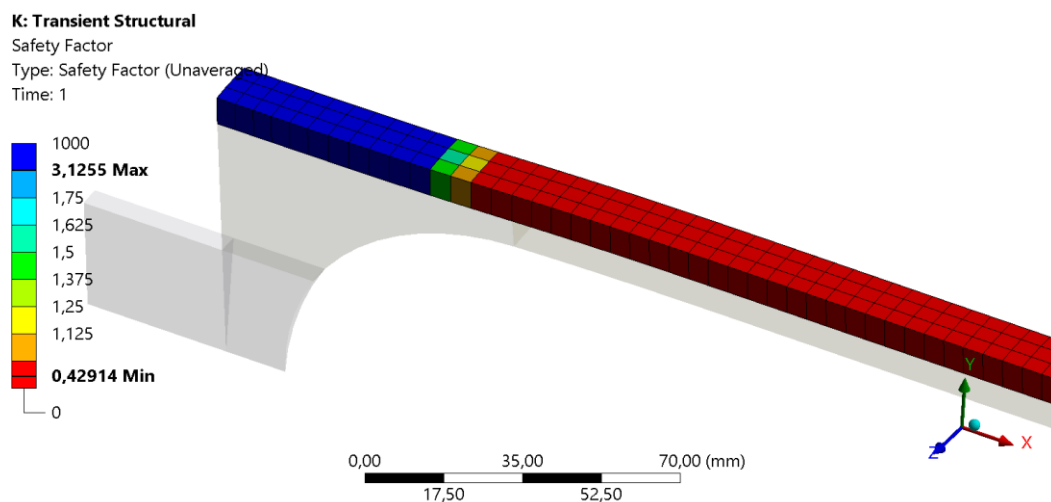
V tomto návrhu byla vrstva kompozitu vytvořena pouze z lamin s orientací 90° . To znamená, že vlákna směřují ve směru obvodového napětí. Tento směr je také nejvíce namáhán, jak bylo zjištěno při analýze ocelové hlavně.

Počáteční návrh

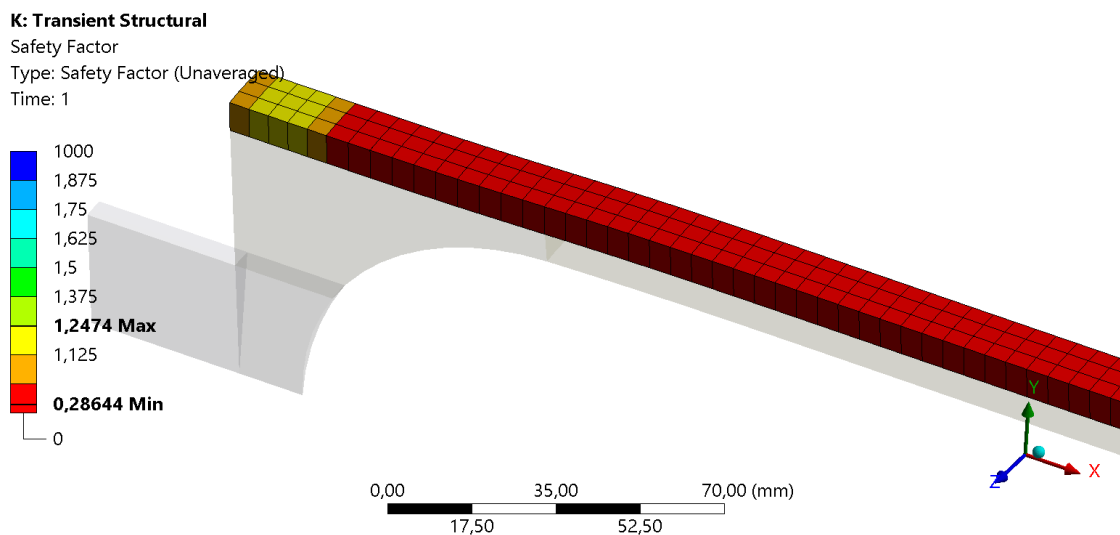
Při úpravě hlavně byla zredukována tloušťka stěny o $7,5\text{ mm}$. Nabízí se tedy nahradit tuto tloušťku kompozitem. Použitý kompozit lze zapsat $[90_{15}]$.



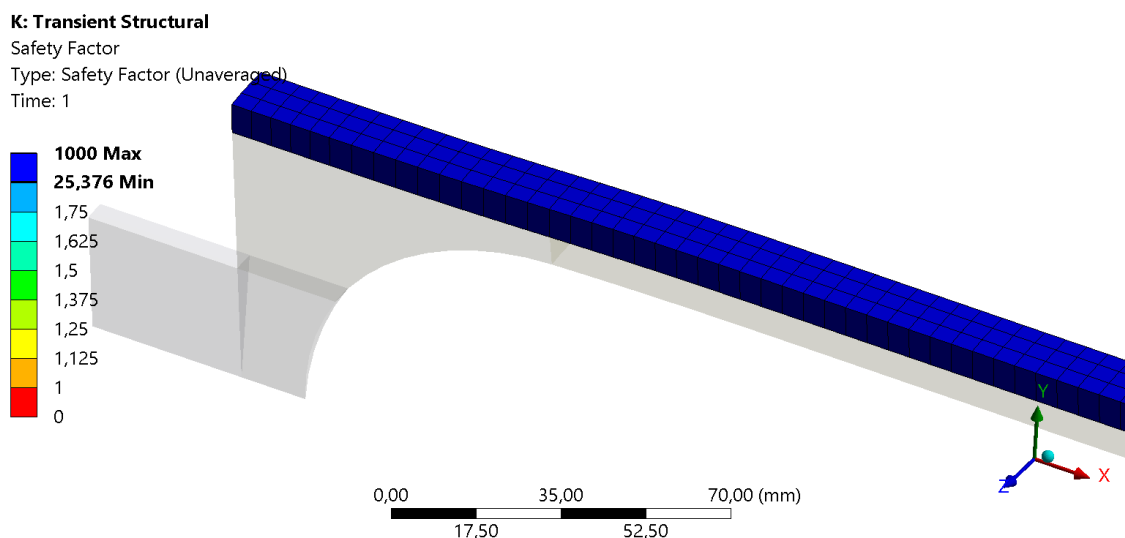
Obr. 32 – Tsai Wu kritérium pro kompozit tloušťky $7,5\text{ mm}$ (všechny vrstvy)



Obr. 33 – Kritérium maximálního napětí pro kompozit tloušťky $7,5\text{ mm}$ pro selhání vláken (všechny vrstvy)

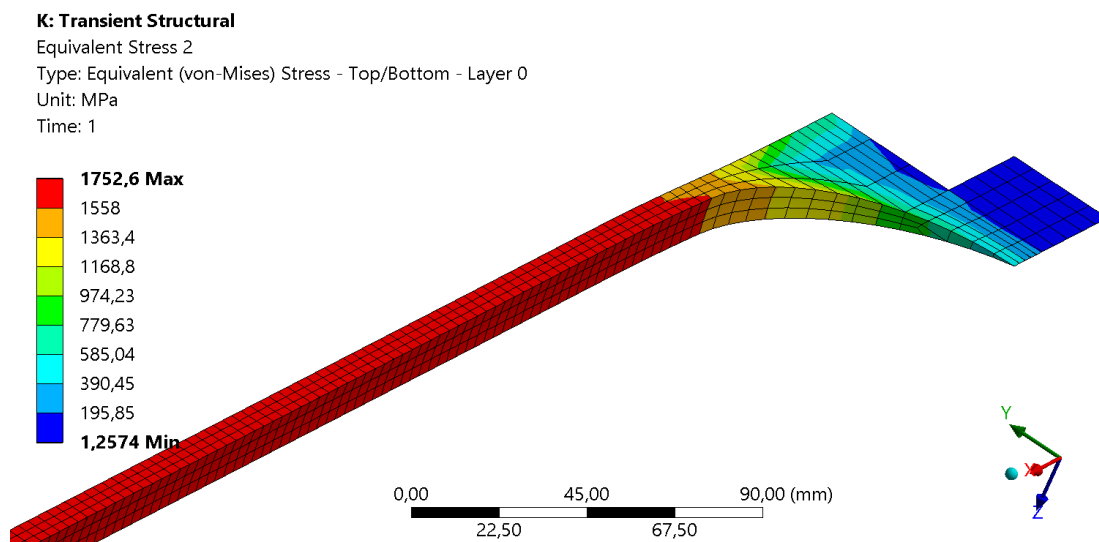


Obr. 34 – Kritérium maximálního napětí pro kompozit tloušťky 7,5 mm pro selhání matrixu (všechny vrstvy)

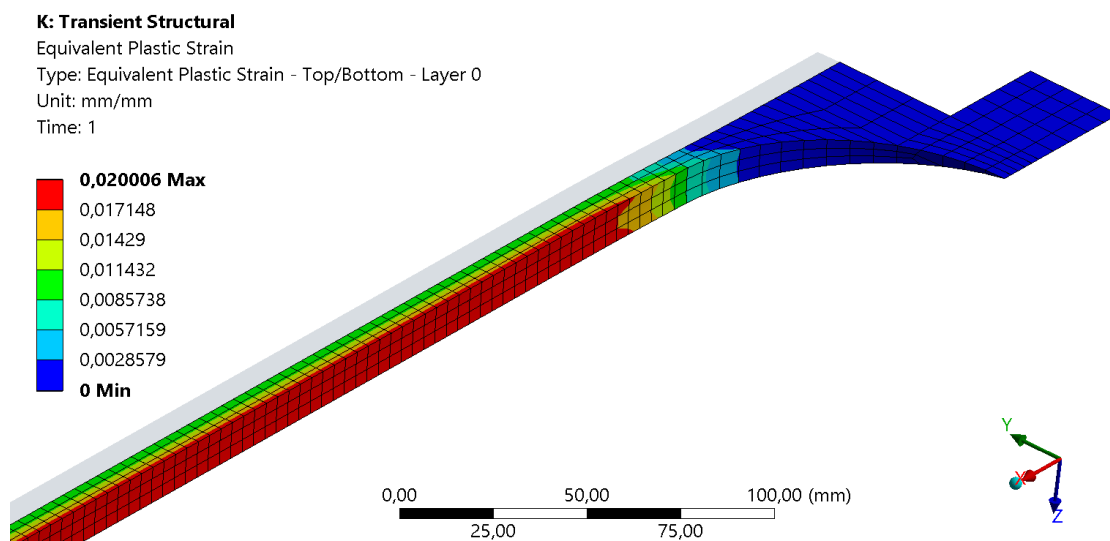


Obr. 35 – Kritérium maximálního napětí pro kompozit tloušťky 7,5 mm pro selhání ve smyku (všechny vrstvy)

V obou kritériích kompozit nevyhověl. Kritérium maximálních napětí bylo zvlášť posouzeno pro stav selhání vláken, matrixu a selhání ve smyku. Z Obr. 35 vychází, že smykové namáhání kompozitu není významné, což odpovídá orientaci vláken kompozitu. Z tohoto důvodu není potřeba v dalších variantách kapitoly 8.3.1 již hodnotit hledisko smykového selhání kompozitního materiálu.



Obr. 36 – Ekvivalentní napětí v čase 1 s pro počáteční návrh

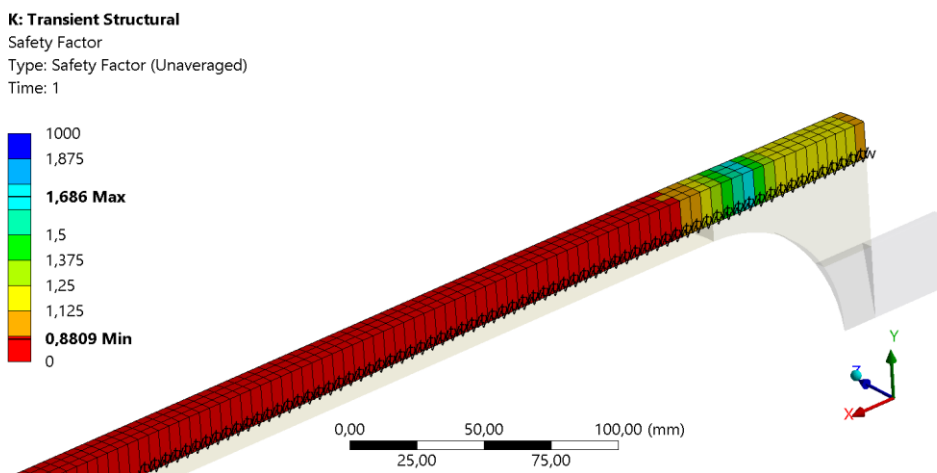


Obr. 37 – Ekvivalentní plastické přetvoření v čase 1 s pro počáteční návrh

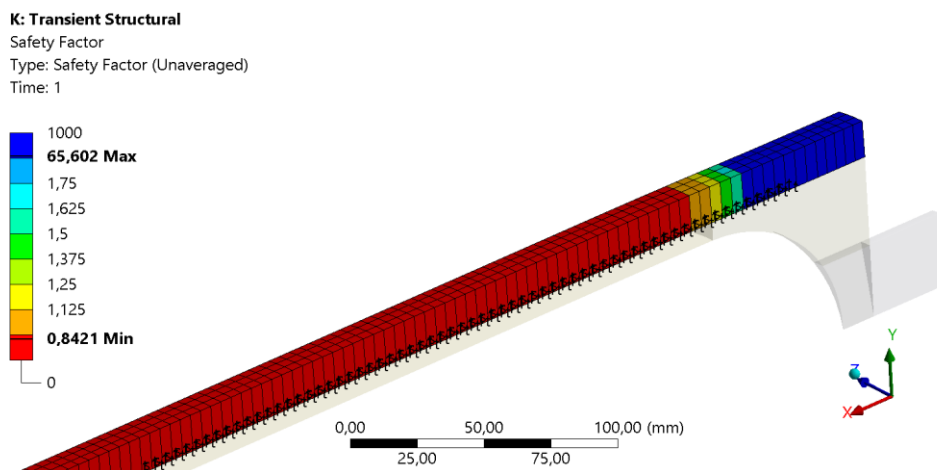
Z Obr. 36 je vidět, že maximální ekvivalentní napětí nepřesáhlo skutečné napětí při přetržení. Nicméně ekvivalentní plastické přetvoření na Obr. 37 dosáhlo 2 %, což je o procento více než u ocelové hlavně. To může ovlivnit funkčnost hlavně, proto je potřeba zvýšit tloušťku kompozitu, aby bylo dosaženo plastického přetvoření do 1 %, jak tomu je u ocelové hlavně.

Druhý návrh

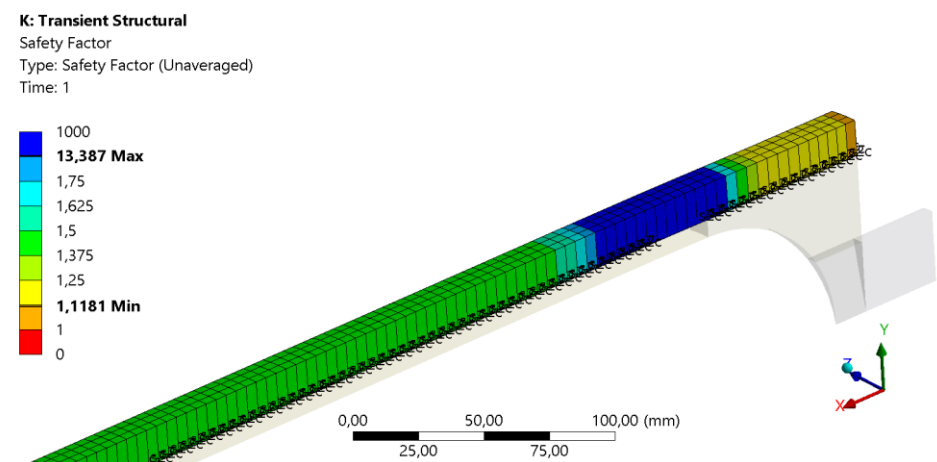
Nový návrh má tloušťku ocelové části 7,5 mm a kompozit má tloušťku 15 mm. Kompozit lze zapsat $[90_{30}]$. K zdvojnásobení tloušťky kompozitu bylo přistoupeno, protože kritéria selhání byla v předchozím návrhu velmi výrazně nesplněna.



Obr. 38 – Tsai Wu kritérium pro kompozit tloušťky 15 mm (všechny vrstvy)



Obr. 39 – Kritérium maximálního napětí pro kompozit tloušťky 15 mm pro selhání vláken (všechny vrstvy)



Obr. 40 – Kritérium maximálního napětí pro kompozit tloušťky 15 mm pro selhání matrixu (všechny vrstvy)

Z Obr. 38 je patrné, že kompozit nevyhověl. Z kritérií maximálních napětí na Obr. 39 a Obr. 40 vychází, že z pohledu matrixu je kompozit v pořádku. Nicméně dochází k selhání kompozitu kvůli vláken. Je tedy opět nutné zvýšit tloušťku kompozitu.

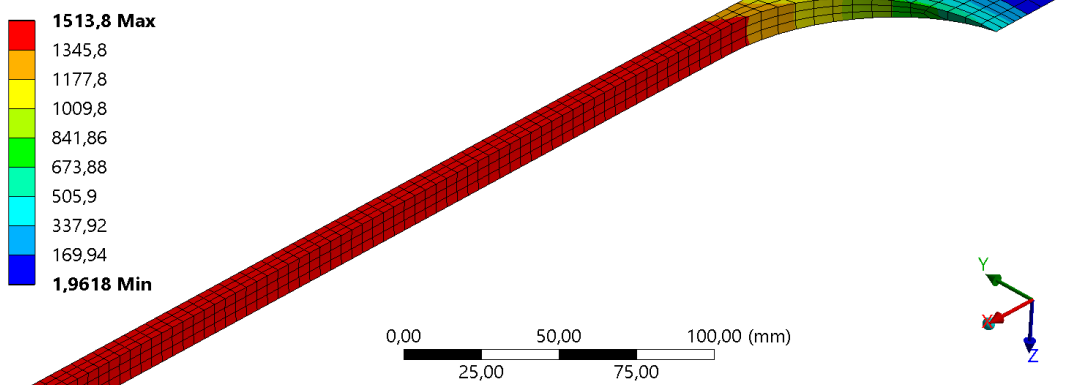
K: Transient Structural

Equivalent Stress 2

Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom - Layer 0

Unit: MPa

Time: 1



Obr. 41 – Ekvivalentní napětí v čase 1 s pro druhý návrh

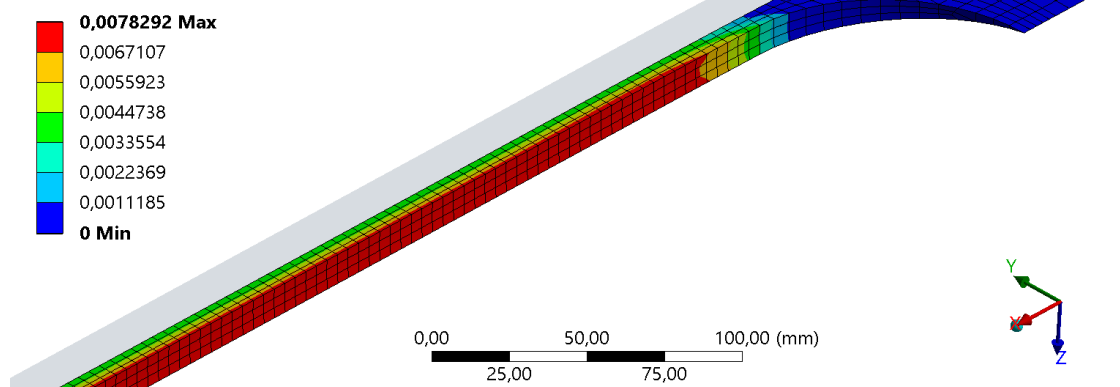
K: Transient Structural

Equivalent Plastic Strain

Type: Equivalent Plastic Strain - Top/Bottom - Layer 0

Unit: mm/mm

Time: 1

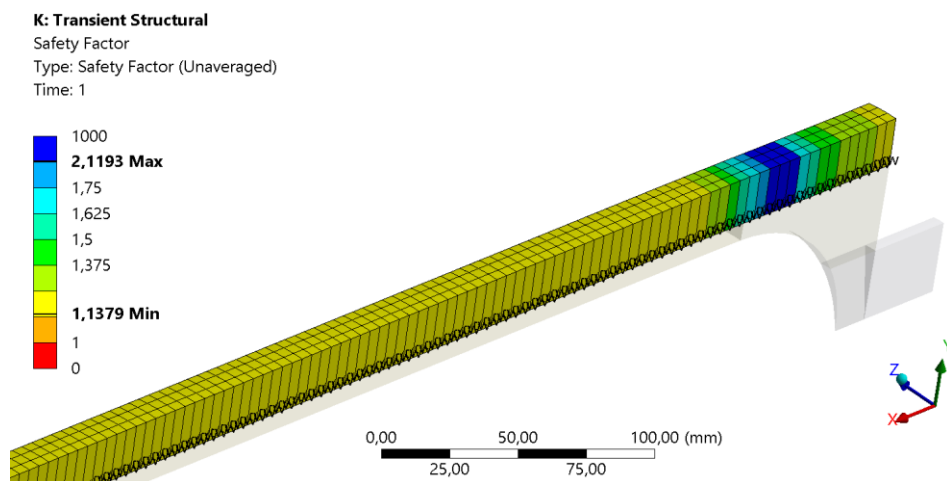


Obr. 42 – Ekvivalentní plastické přetvoření v čase 1 s pro druhý návrh

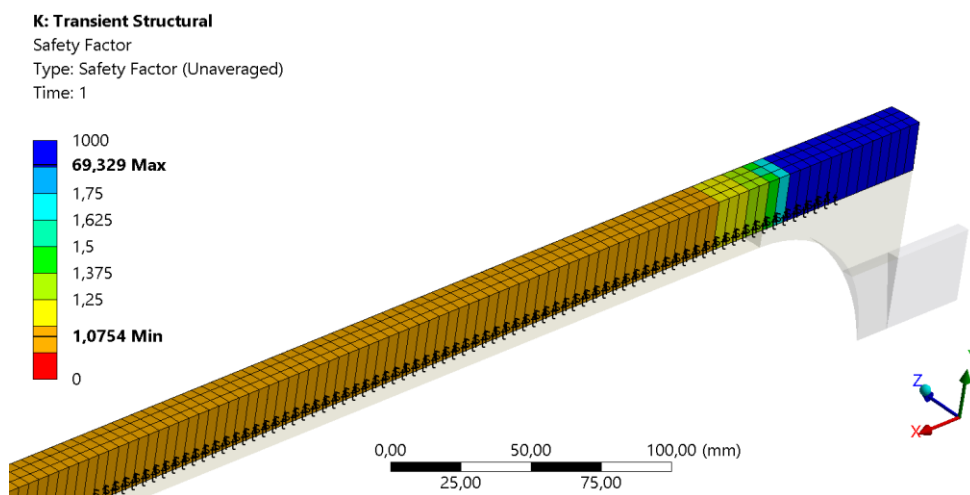
Z Obr. 41 je vidět, že maximální ekvivalentní napětí dosahuje 1513 MPa, což je opět pod skutečným napětím při přetržení. Na Obr. 41 je znázorněno plastické přetvoření hlavně. Maximální hodnota je 0,8 %, což splňuje podmínku, že plastické přetvoření nemá přesáhnout původní hodnotu z ocelové hlavně.

Finální návrh

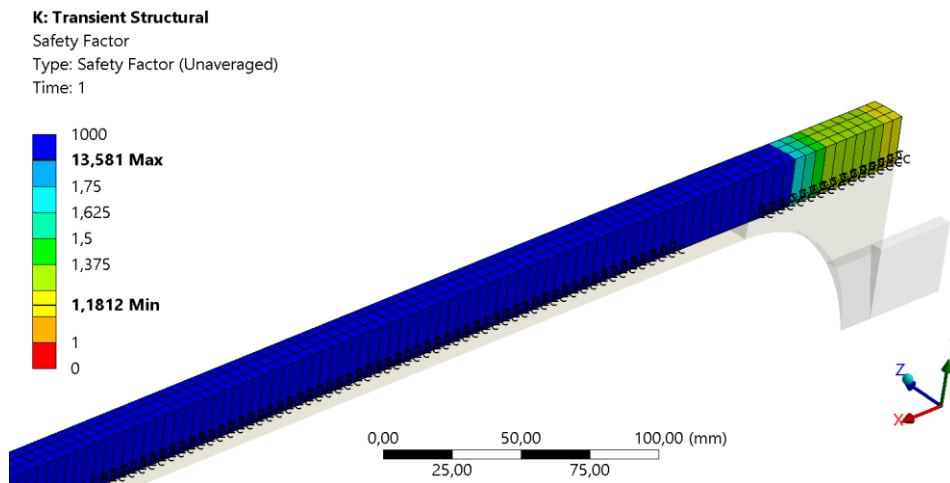
Tloušťka kompozitu v tomto kroku byla zvolena o 5 mm větší než v předchozím návrhu. Je tedy 20 mm. Zápis kompozitu tedy vypadá $[90_{40}]$.



Obr. 43 – Tsai Wu kritérium pro kompozit tloušťky 20 mm (všechny vrstvy)

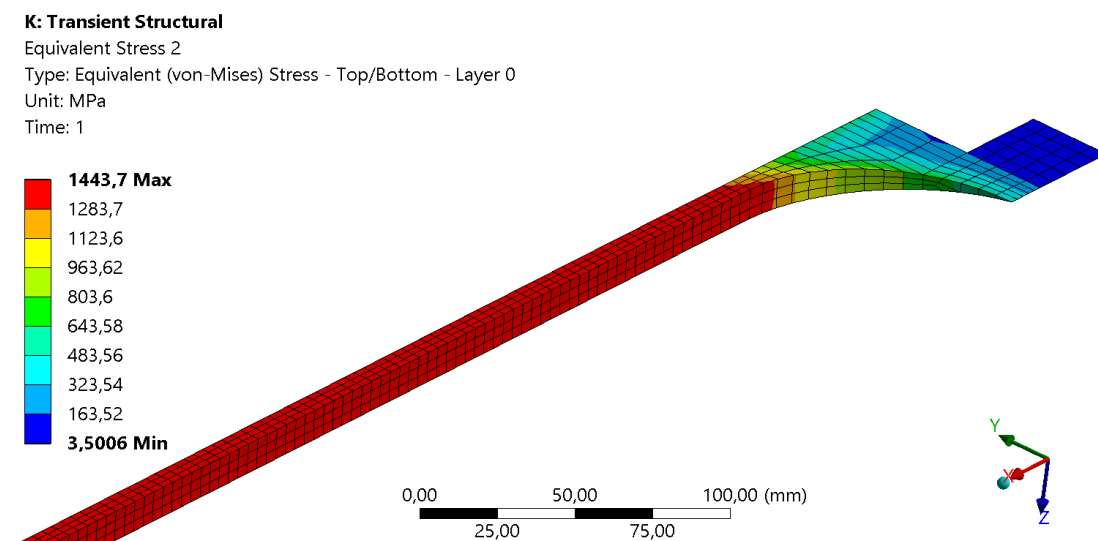


Obr. 44 – Kritérium maximálního napětí pro kompozit tloušťky 20 mm pro selhání vláken (všechny vrstvy)

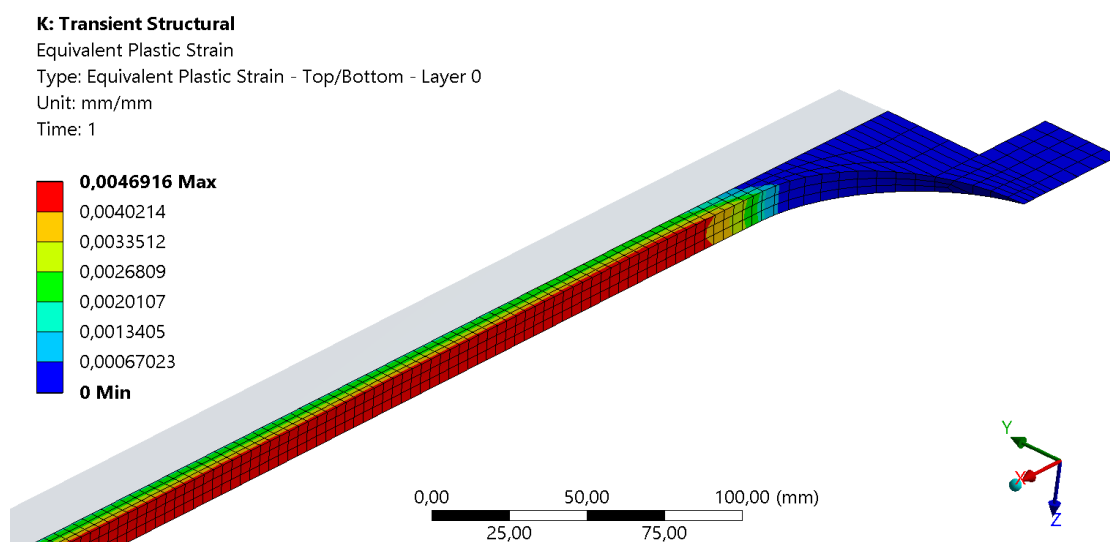


Obr. 45 – Kritérium maximálního napětí pro kompozit tloušťky 20 mm pro selhání matrixu (všechny vrstvy)

Z Obr. 43, Obr. 44 a Obr. 45 je patrné, že kompozit vyhověl. Z pohledu kompozitu je možné přestat upravovat návrh.



Obr. 46 – Ekvivalentní napětí v čase 1 s pro finální návrh



Obr. 47 – Ekvivalentní plastické přetvoření v čase 1 s pro finální návrh

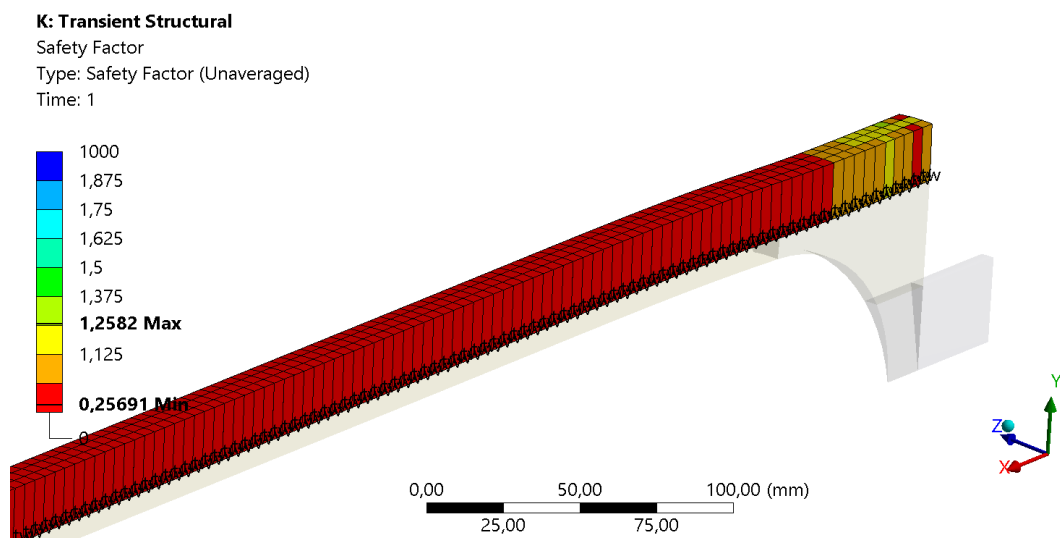
Z napětově-deformačního hlediska je konstrukce také v pořádku. Ekvivalentní napětí přesáhlo mez kluzu, ale drží se v hodnotách velice dalekých od skutečného napětí při přetržení. Limit plastické deformace do 1 % byl dodržen. První návrh kompozitní hlavně je hotov.

8.3.2. Návrh 2

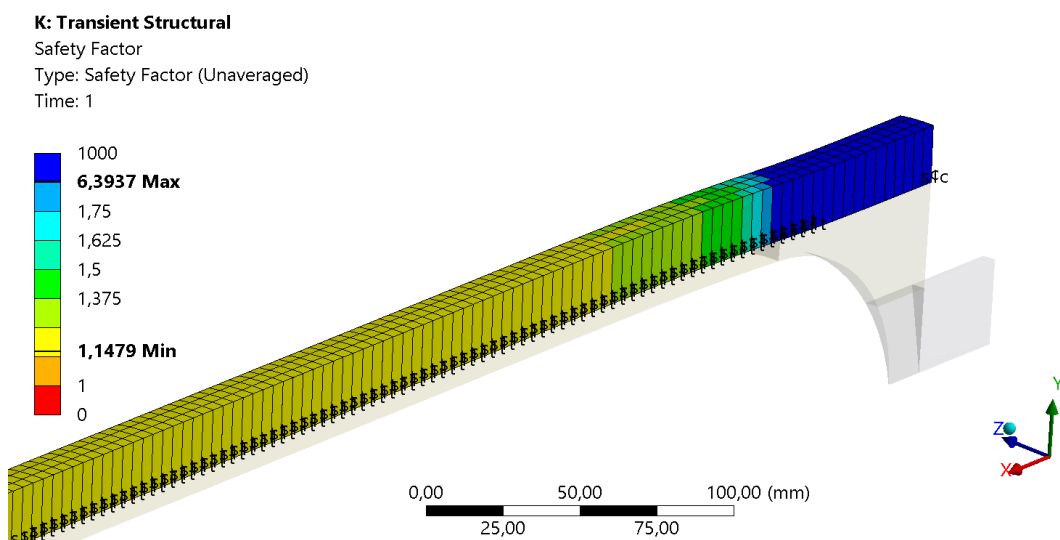
Návrh 2 byl proveden s použitím vrstev z více orientacemi. Počáteční tloušťka kompozitu byla zvolena na 20 mm, což vychází ze zkušeností z předchozího návrhu.

Počáteční návrh

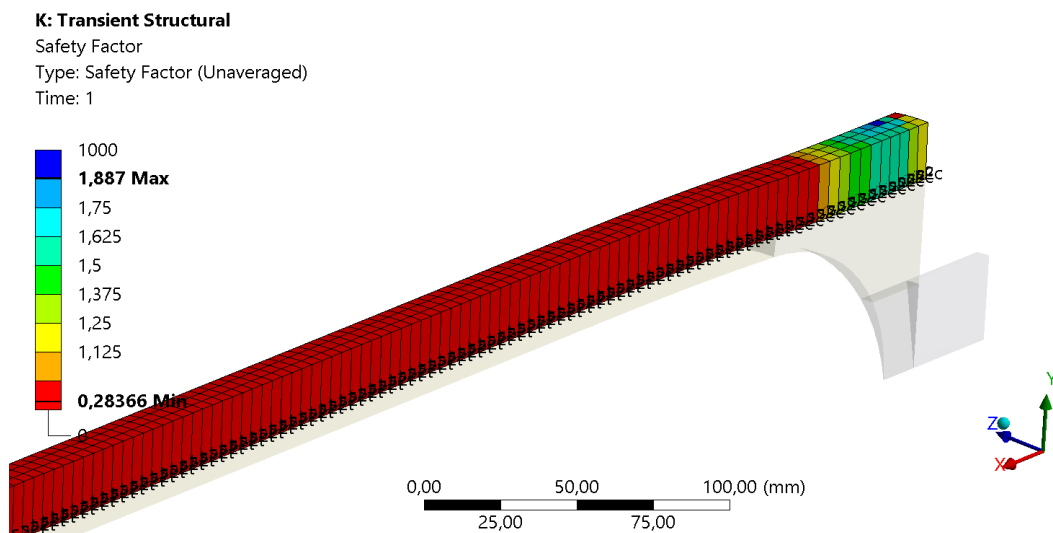
Pro počáteční návrh byl použit kompozit s vrstvami $[45_{20}/-45_{20}]$.



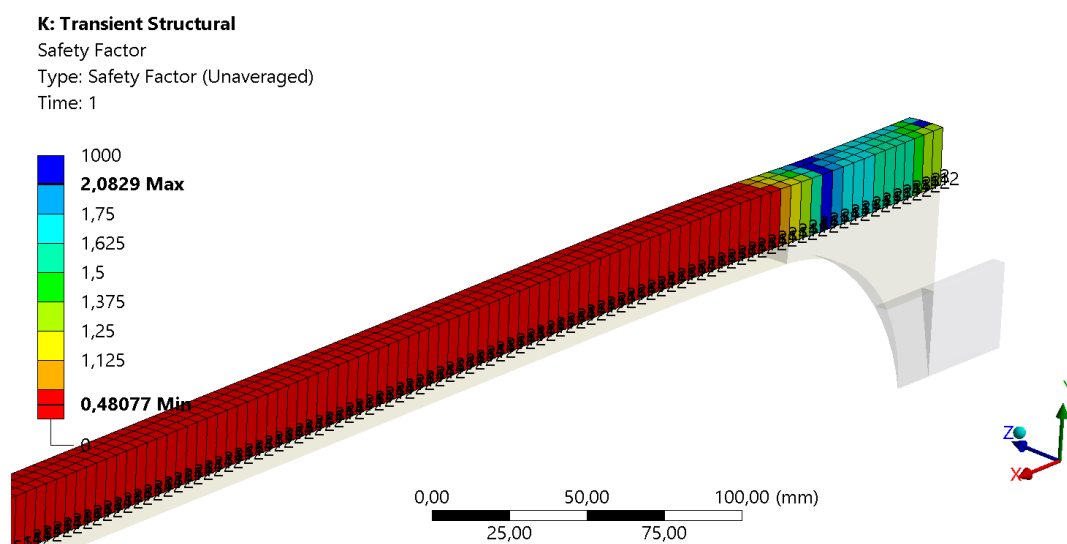
Obr. 48 – Tsai Wu kritérium pro kompozit $[45_{20}/-45_{20}]$ (všechny vrstvy)



Obr. 49 – Kritérium maximálního napětí pro vlákna kompozitu $[45_{20}/-45_{20}]$ (všechny vrstvy)

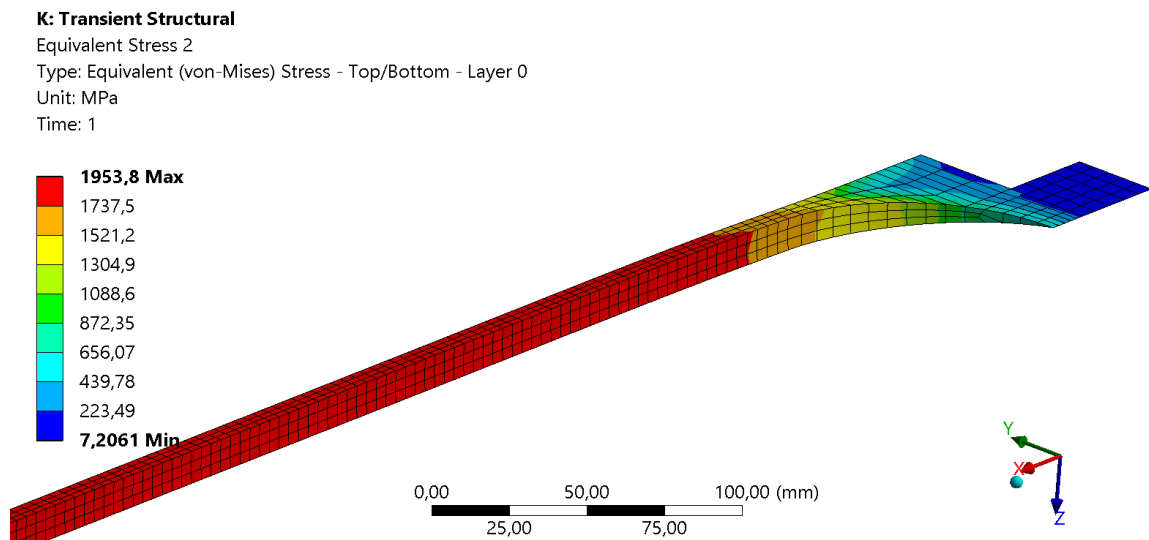


Obr. 50 – Kritérium maximálního napětí pro matrix kompozitu $[45_{20}/-45_{20}]$ (všechny vrstvy)

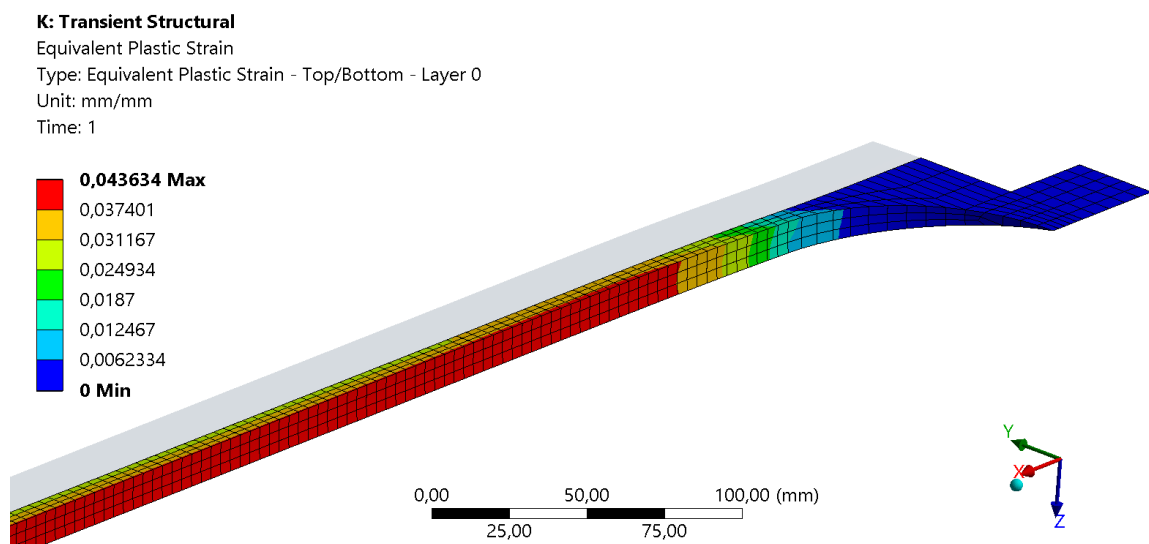


Obr. 51 – Kritérium maximálního napětí pro smyk kompozitu $[45_{20}/-45_{20}]$ (všechny vrstvy)

Obr. 48 ukazuje Tsai Wu kritérium, podle kterého jde říct, že kompozit selhal, ale není jasné, jakým způsobem. Na to dává odpověď kritérium maximálních napětí. Obr. 49 vyhodnocuje směr vláken a v tomto hledisku kompozit vydržel zatížení. Obr. 50 a Obr. 51 naopak ukazují selhání kompozitu. Došlo k selhání matrixu a také k selhání ve smyku. Je nutné upravit návrh. Úprava by měla posílit obvodový směr geometrie.



Obr. 52 – Ekvivalentní napětí v čase 1 s pro počáteční návrh

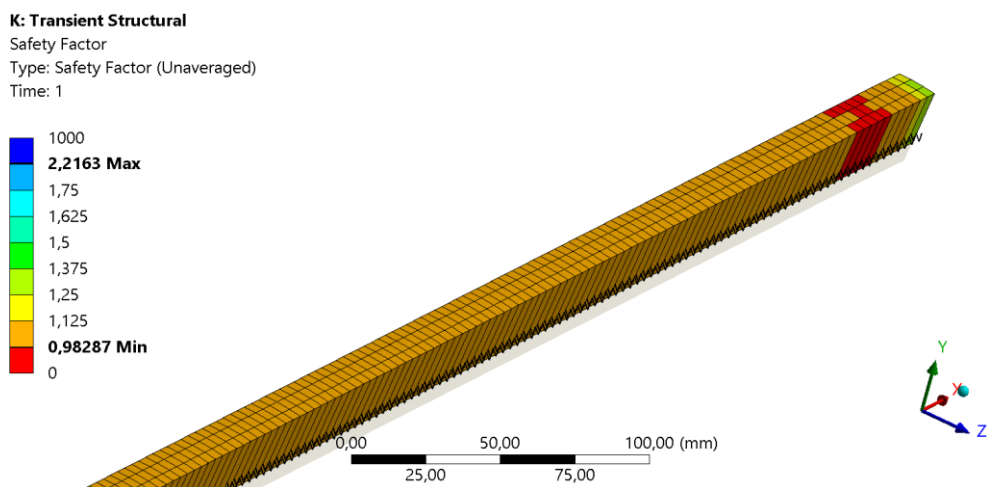


Obr. 53 – Ekvivalentní plastické přetvoření v čase 1 s pro počáteční návrh

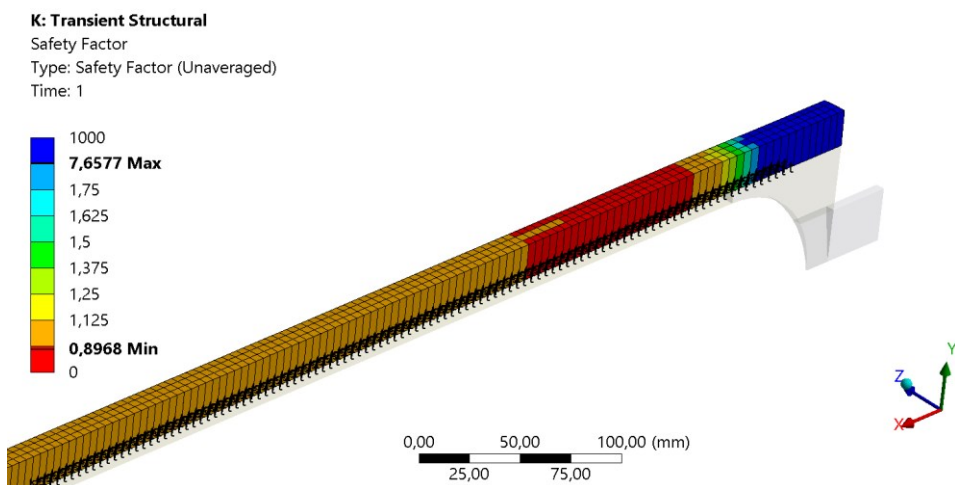
Na Obr. 52 je vykreslen průběh ekvivalentních napětí. Maximální dosažená hodnota je 1953 MPa, což je stále pod skutečným napětím při prasknutí. Nicméně z Obr. 53 je vidět, že plastické přetvoření dosahuje přes 4 %. To je další důvod, proč byla navržena nová varianta.

Druhý návrh

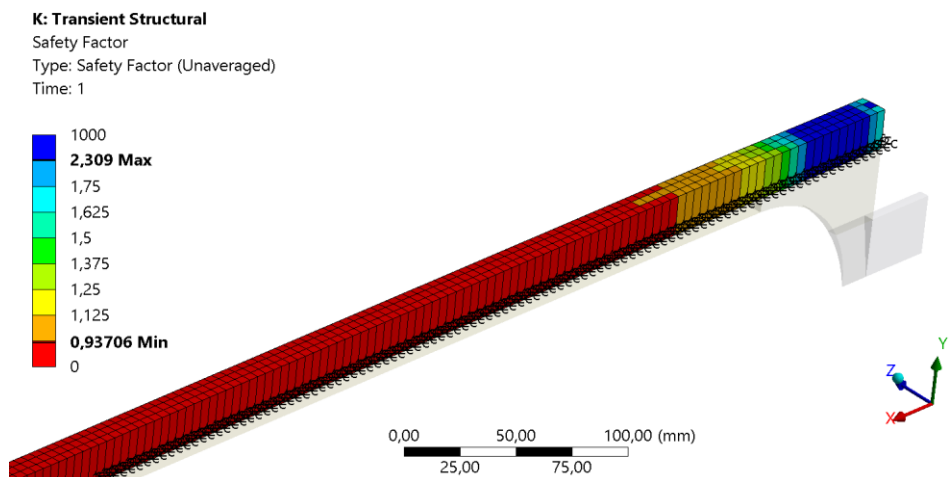
Protože počáteční návrh nevyhověl, bylo přistoupeno ke změně orientace vláken. Nový kompozit má orientaci vláken $[90_{20}/45_{10}/-45_{10}]$. Tloušťka vrstvy byla zachována.



Obr. 54 – Tsai Wu kritérium pro kompozit $[90_{20}/45_{10}/-45_{10}]$ (všechny vrstvy)



Obr. 55 – Kritérium maximálního napětí pro vlákna kompozitu $[90_{20}/45_{10}/-45_{10}]$ (všechny vrstvy)



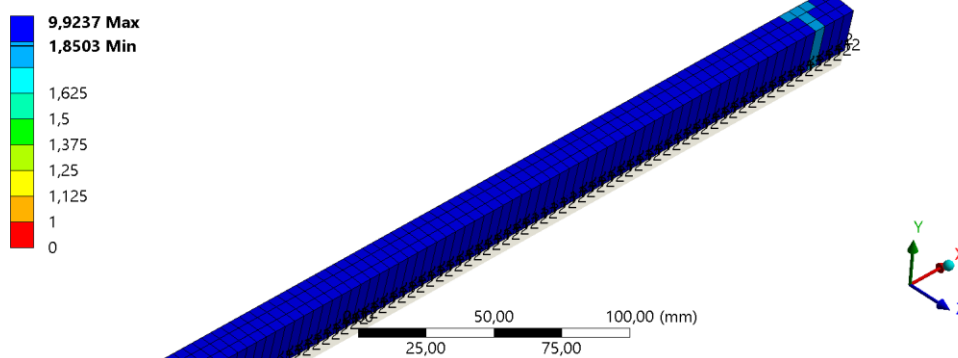
Obr. 56 – Kritérium maximálního napětí pro matrixu kompozitu $[90_{20}/45_{10}/-45_{10}]$ (všechny vrstvy)

K: Transient Structural

Safety Factor

Type: Safety Factor (Unaveraged)

Time: 1

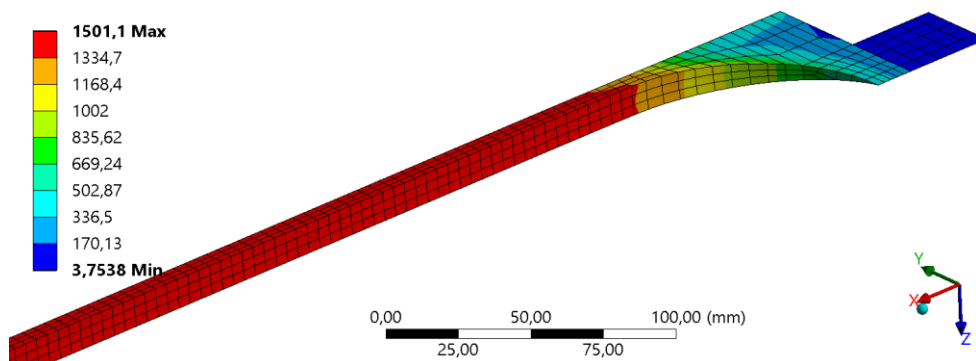
Obr. 57 – Kritérium maximálního napětí pro smyk kompozitu $[90_{20}/45_{10}/-45_{10}]$ (všechny vrstvy)**K: Transient Structural**

Equivalent Stress 2

Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom - Layer 0

Unit: MPa

Time: 1



Obr. 58 – Ekvivalentní napětí v čase 1 s pro druhý návrh

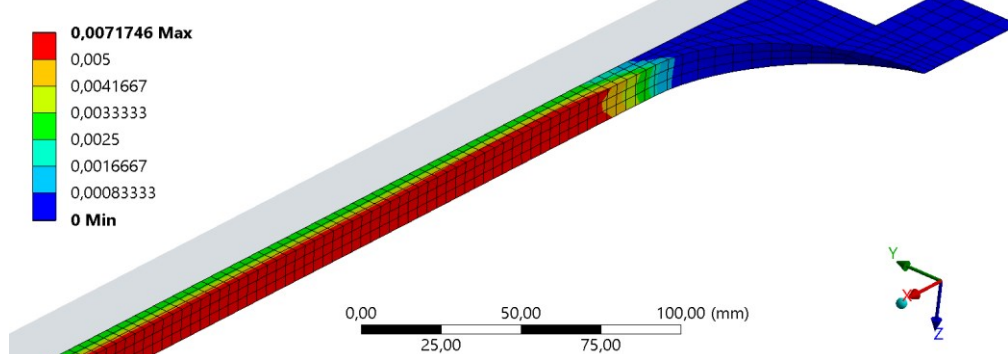
K: Transient Structural

Equivalent Plastic Strain

Type: Equivalent Plastic Strain - Top/Bottom - Layer 0

Unit: mm/mm

Time: 1



Obr. 59 – Ekvivalentní plastické přetvoření v čase 1 s pro druhý návrh

Došlo ke kvalitativnímu zlepšení, nicméně kompozit stále nevyhovuje. Ekvivalentní napětí se pohybuje pod limity a ekvivalentní plastické přetvoření je také pod 1 %. Stále je ale potřeba vylepšit návrh.

Finální návrh

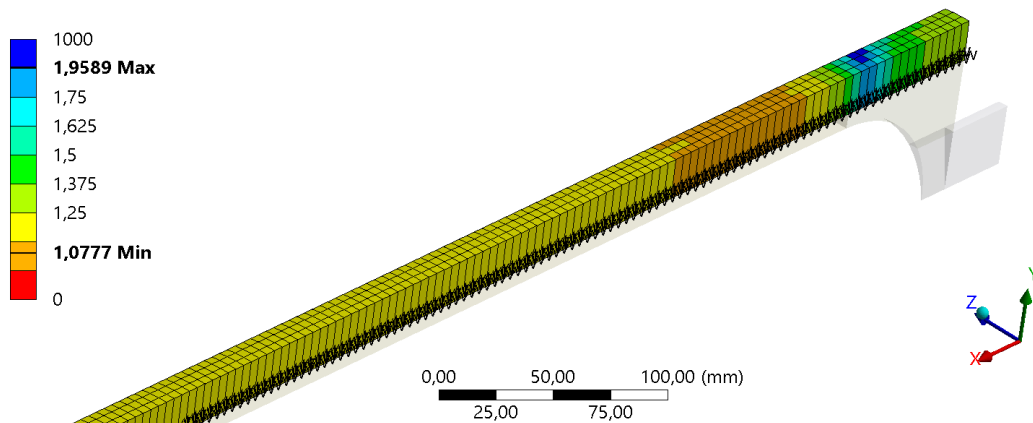
Nový kompozit má tvar $[90_{20}/70_{10}/-70_{10}]$. Laminy, které měly původně orientaci 45° a -45° jsou nyní natočeny o 70° , respektive o -70° . Tloušťka zůstává nezměněna.

K: Transient Structural

Safety Factor

Type: Safety Factor (Unaveraged)

Time: 1



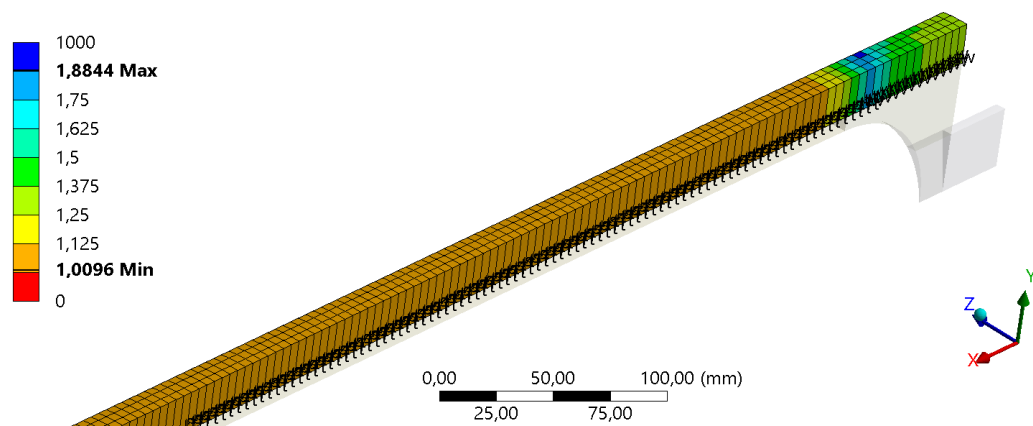
Obr. 60 – Tsai Wu kritérium pro kompozit $[90_{20}/70_{10}/-70_{10}]$ (všechny vrstvy)

K: Transient Structural

Safety Factor

Type: Safety Factor (Unaveraged)

Time: 1



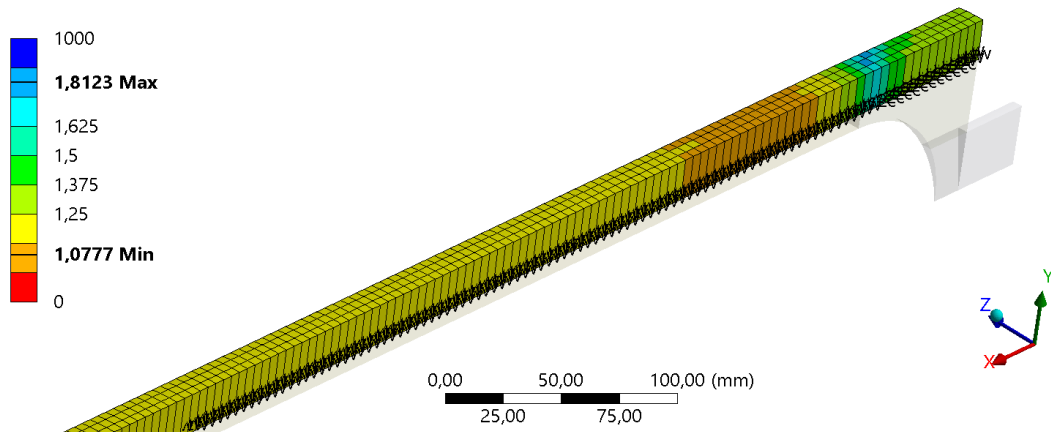
Obr. 61 – Kritérium maximálního napětí pro vlákna kompozitu $[90_{20}/70_{10}/-70_{10}]$ (všechny vrstvy)

K: Transient Structural

Safety Factor

Type: Safety Factor (Unaveraged)

Time: 1



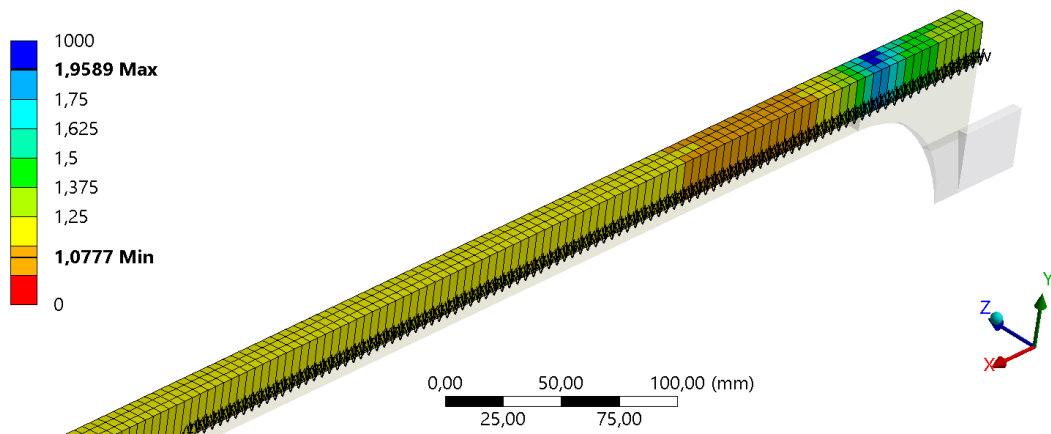
Obr. 62 – Kritérium maximálního napětí pro smyk kompozitu $[90_{20}/70_{10}/-70_{10}]$ (všechny vrstvy)

K: Transient Structural

Safety Factor

Type: Safety Factor (Unaveraged)

Time: 1



Obr. 63 – Kritérium maximálního napětí pro smyk kompozitu $[90_{20}/70_{10}/-70_{10}]$ (všechny vrstvy)

Podle obou kritérií návrh vyhovuje. Nejslabší je situace v obvodovém směru, kde je bezpečnost 1,0096. Každopádně je kritérium splněno a je možné ukončit optimalizaci.

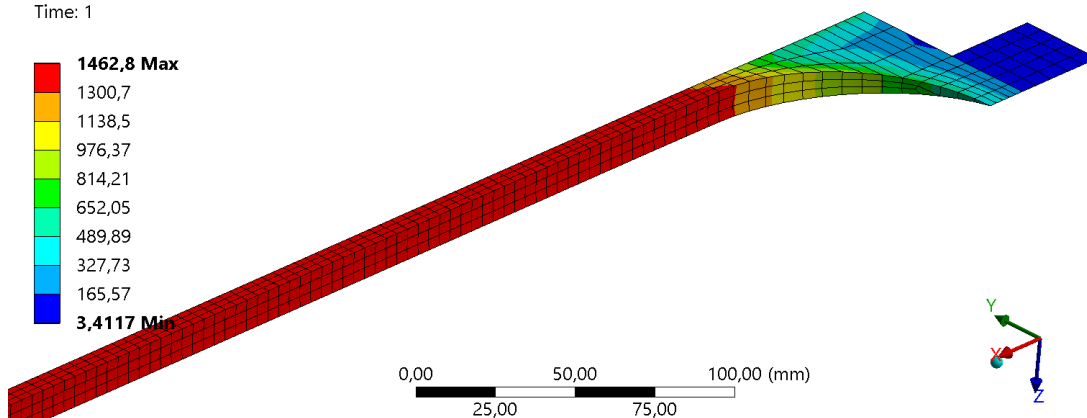
K: Transient Structural

Equivalent Stress 2

Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom - Layer 0

Unit: MPa

Time: 1

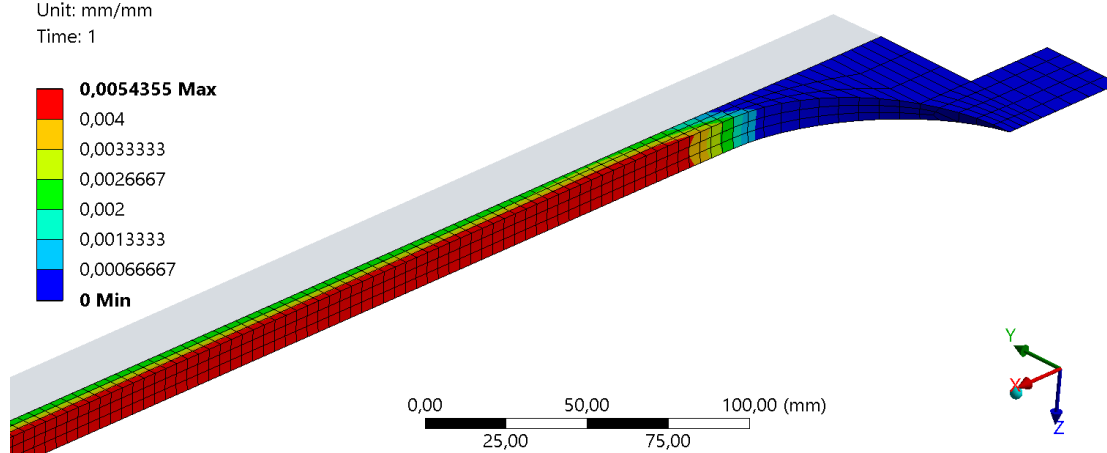
*Obr. 64 – Ekvivalentní napětí v čase 1 s pro finální návrh***K: Transient Structural**

Equivalent Plastic Strain

Type: Equivalent Plastic Strain - Top/Bottom - Layer 0

Unit: mm/mm

Time: 1

*Obr. 65 – Ekvivalentní plastické přetvoření v čase 1 s pro finální návrh*

Z Obr. 64 je možné vyčíst maximální napětí, které má hodnotu 1462 MPa. Obr. 65 vykresluje plastické přetvoření, které dosahuje maximální hodnoty 0,5 %, což vyhovuje limitaci stanovené od původní geometrie.

8.4. Vyhodnocení autofretáže (kompozitní hlavěň)

Průběhy ekvivalentních napětí, plastických přetvoření a posouzení kompozitu pro jednotlivé varianty návrhů jsou k prostudování v kapitolách 8.3.1 a 8.3.2. Vyhodnocení autofretáže se bude týkat zbytkových napětí.

8.4.1. Návrh 1

G: Transient Structural

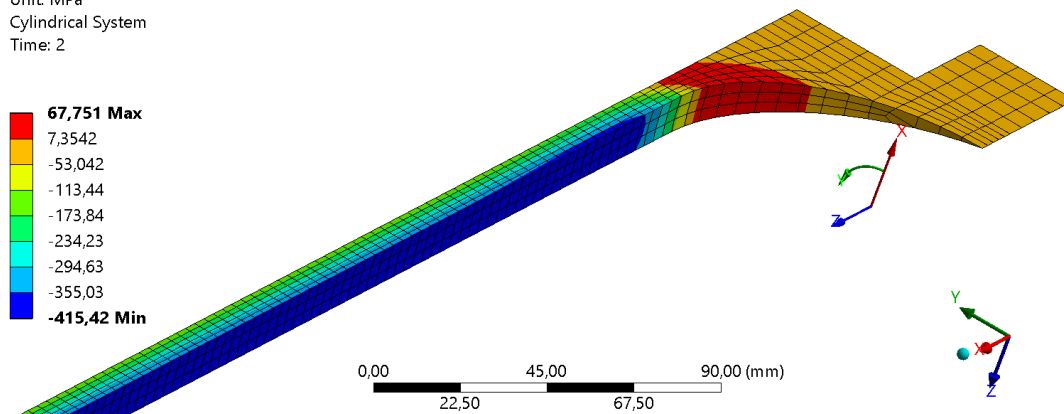
Normal Stress 2

Type: Normal Stress(Y Axis) - Top - Layer 0

Unit: MPa

Cylindrical System

Time: 2



Obr. 66 – Zbytkové obvodové napětí na nezátížené hlavni po autofretáži v čase 2 s (Návrh 1)

Z Obr. 66 je patrné, že autofretáž proběhla úspěšně a bylo vyvozeno obvodové tlakové napětí na vnitřním průměru o hodnotě -415 MPa. Navíc díky stlačování kompozitní vrstvou je celá ocelová stěna stlačována. To je rozdíl oproti ocelové hlavni.

8.4.2. Návrh 2

I: Transient Structural

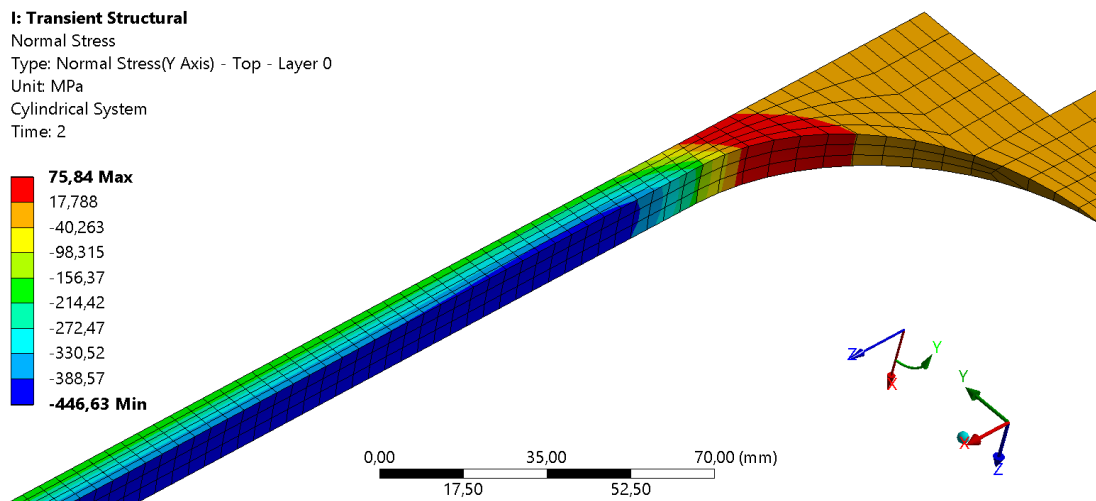
Normal Stress

Type: Normal Stress(Y Axis) - Top - Layer 0

Unit: MPa

Cylindrical System

Time: 2



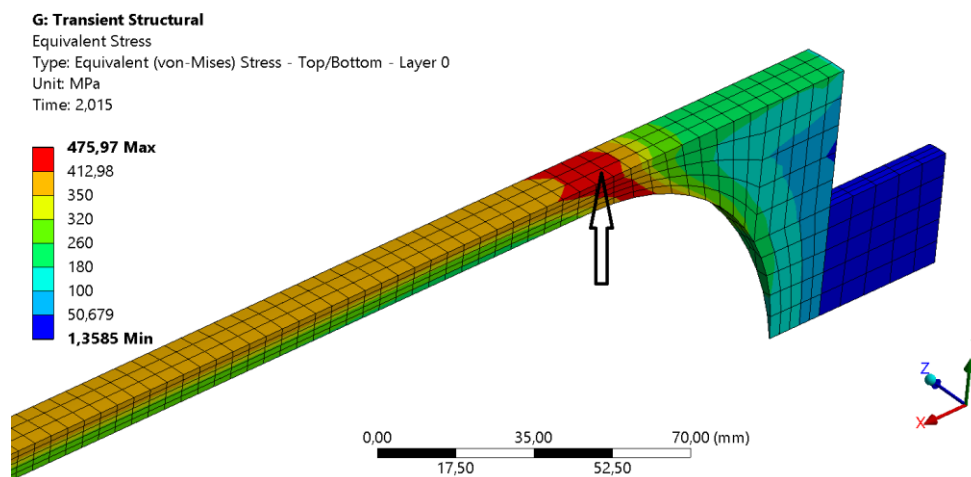
Obr. 67 – Zbytkové obvodové napětí na nezátížené hlavni po autofretáži v čase 2 s (Návrh 2)

Obr. 67 vykresluje zbytkové obvodové napětí. Ocelová stěna v duté části hlavě je převážně stlačována, a to po celé tloušťce. Na vnitřním povrchu je napětí do -446 MPa a vnějším povrchu se napětí pohybuje v rozmezí -156 až -214 MPa.

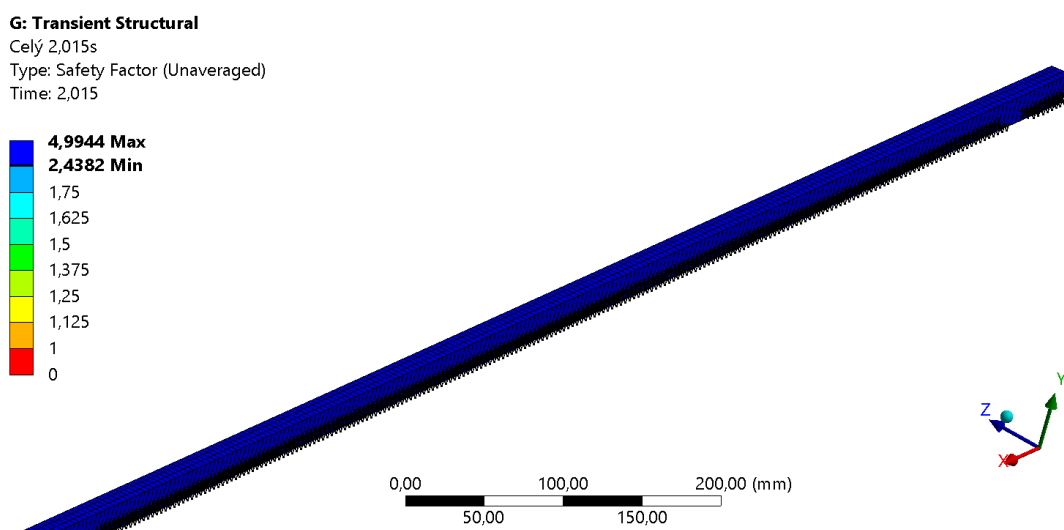
8.5. Vyhodnocení výstřelu z kompozitní hlavně

Pro vyhodnocení tohoto děje bude použito ekvivalentního napětí a v kritickém místě bude následně vyhodnocen napěťový stav pro určení typu napjatosti.

8.5.1. Návrh 1

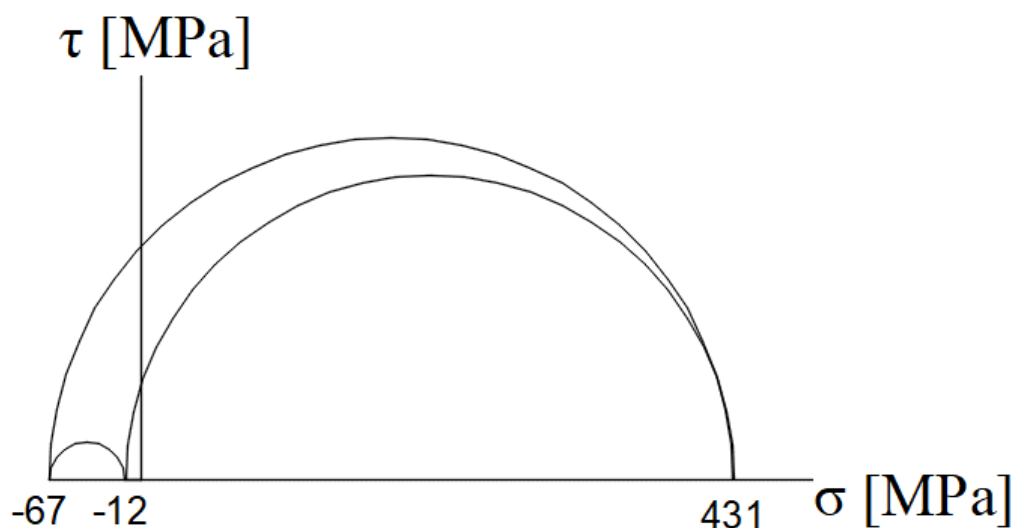


Obr. 68 – Určení kritického místa při výstřelu (Návrh 1)



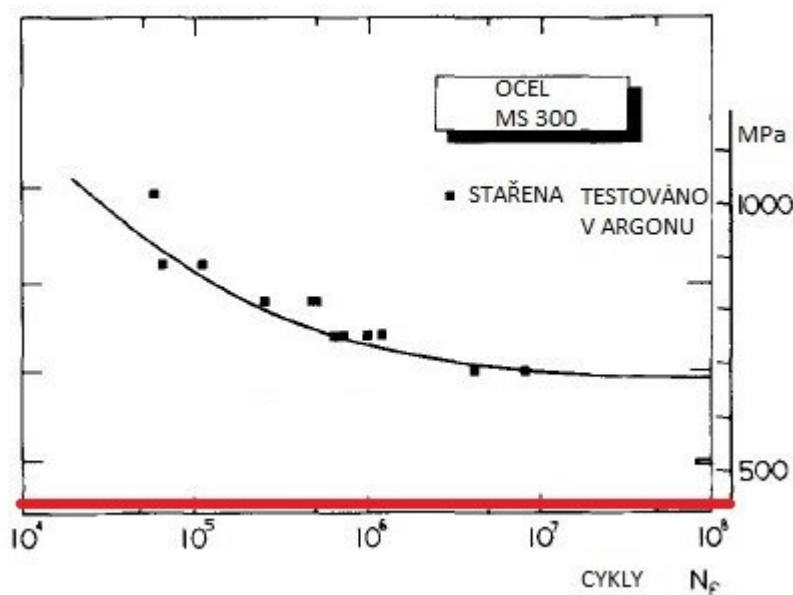
Obr. 69 – Tsai Wu kritérium při výstřelu pro čas 2,015 s varianta „Návrh 1“

Obr. 68 vykresluje ekvivalentní napětí. Místo, kde je jeho hodnota nejvyšší je kritickým místem. V této lokaci se ekvivalentní napětí pohybuje okolo 470 MPa. Toto místo je označeno šipkou a v blízkém uzlu bude vyhodnocován napěťový stav. Vyhodnocení napěťového stavu je důležité pro zhodnocení únavy materiálu. Na Obr. 69 je znázorněno Tsai Wu kritérium. Kompozit jej bez problému splní. Bude tedy upuštěno od vyhodnocení kritéria maximálních napětí.



Obr. 70 – Mohrova kružnice pro kritické místo na kompozitní hlavni varianty „Návrh 1“

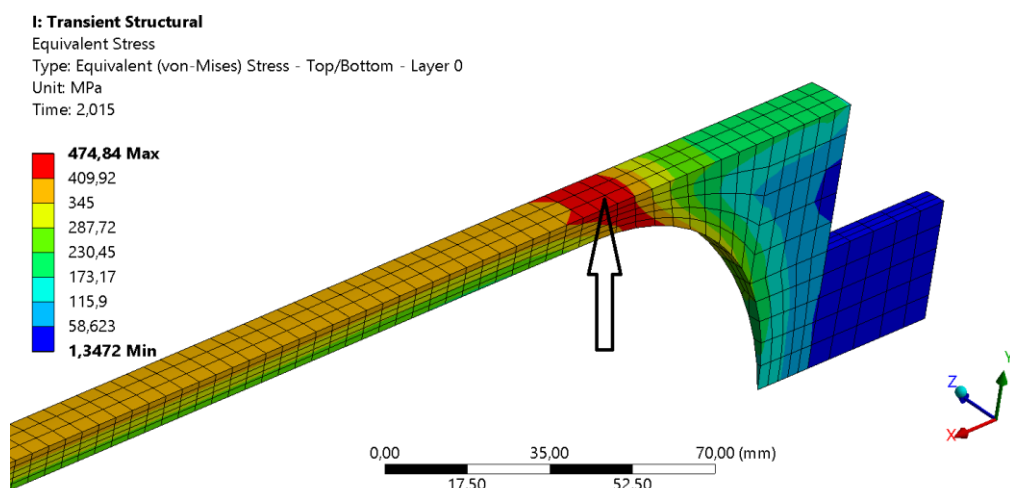
Z Mohrovy kružnice pro kritické místo na Obr. 70 vyplývá, že jeden směr napjatosti je dominantní a jedná se o obvodový směr. Za amplitudu namáhání bude považována hodnota 431 MPa.



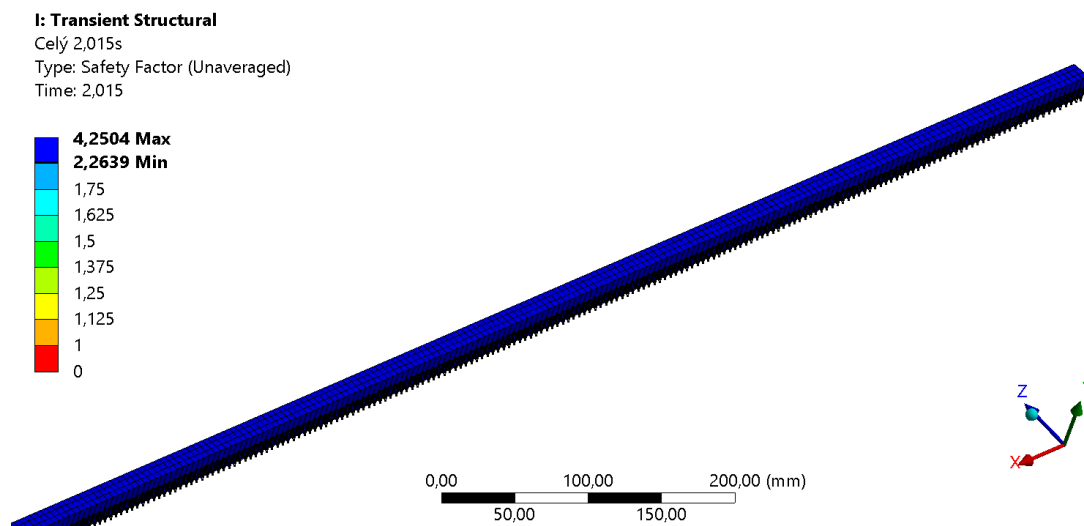
Obr. 71 – Vyhodnocení únavy pro kompozitní hlavě varianty „Návrh 1“

Z Obr. 71 vyplývá, že kompozitní hlavě je při výstřelu zatěžována vysokocyklovou únavou. Amplituda uvažovaného zatížení je výrazně nižší, než je mez únavy, proto je ocelová část kompozitní hlavě dimenzována na nekonečný počet cyklů. Únava materiálu pro kompozit není uvažována.

8.5.2. Návrh 2

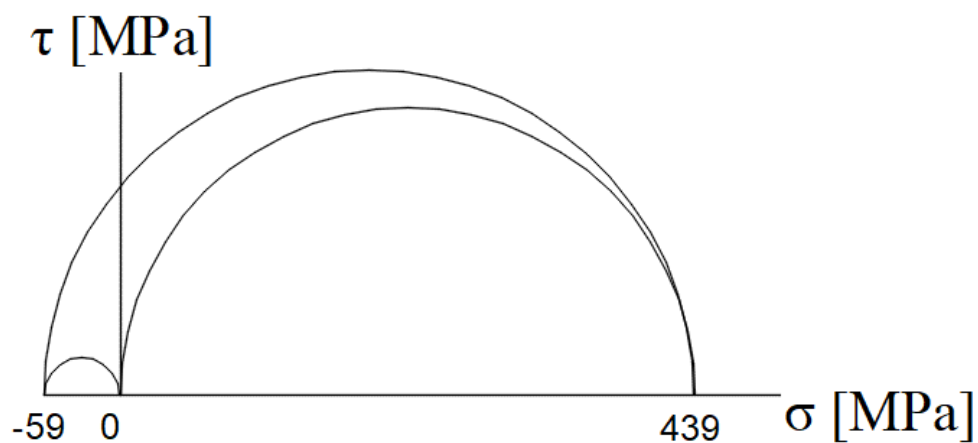


Obr. 72 – Určení kritického místa při výstřelu (Návrh 2)



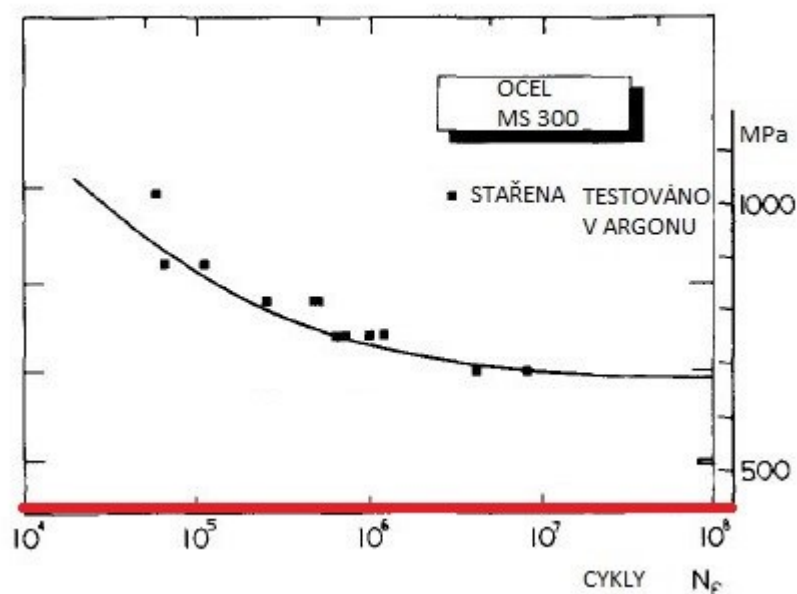
Obr. 73 – Tsai Wu kritérium při výstřelu pro čas 2,015 s varianta „Návrh 2“

Kritické místo geometrie je označeno šipkou na Obr. 72. Maximální napětí se pohybuje okolo 470 MPa. V uzlu, na který ukazuje šipka dojde ke zhodnocení napětěového stavu kvůli zhodnocení únavy materiálu. Platí zde obdobná situace jako pro variantu „Návrh 1“.



Obr. 74 – Mohrova kružnice pro kritické místo na kompozitní hlavní varianty „Návrh 2“

Na Obr. 74 je Mohrova kružnice pro kritické místo na hlavní varianty „Návrh 2“. Mohrova kružnice znázorňuje dominanci jednoho směru napjatosti nad ostatními. Je možné posouzení únavy zjednodušit na uniaxiální problém. Amplituda napětí je 439 MPa.



Obr. 75 – Vyhodnocení únavy pro kompozitní hlaveň varianty „Návrh 2“

Obr. 75 ukazuje amplitudu zatížení při výstřelu. Platí stejné závěry pro únavu materiálu, jako v kapitole 8.5.1.

9. Diskuse

Získané výsledky byly prezentovány v předchozích kapitolách. Bylo přistoupeno k několika zjednodušením, které je třeba rozebrat. Také je potřeba zhodnotit redukci hmotnosti.

Z hlediska hmotnosti bylo dosaženo 26,5 % úspory hmotnosti oproti ocelové hlavni. Tohoto bylo dosaženo zmenšením vnějšího průměru hlavně o 7,5 mm a následným nahrazením této části kompozitním materiálem. Z pohledu nejistot ve výpočtu bylo snížení na poloviční tloušťku konzervativní rozhodnutí, které by při komplexnější analýze mohlo být změněno. Nicméně kvůli nemožnosti určit teplotní podmínky bylo přistoupeno k redukci jen o 7,5 mm, aby byla relativně velká bariéra mezi kompozitem a potenciální vysokou teplotou při výstřelu.

Díky kompozitní úpravě bylo dosaženo většího tlakového napětí po autofretáži než u ocelové hlavě. U ocelové hlavě bylo maximální dosažené tlakové napětí -301 MPa. Naproti tomu byla u kompozitních variant získáno tlakové napětí -415 MPa, respektive -446 MPa. Mezi ocelovou a kompozitními variantami byl ještě další rozdíl. U ocelové hlavě bylo na vnitřním průměru tlakové napětí, ale na vnějším tahové. U kompozitních variant bylo díky kompozitu na ocelové stěně pouze tlakové napětí, což je z hlediska únavy příznivější stav, protože případné trhliny by byly tímto napětím uzavírány.

Z hlediska posouzení únavy bylo v práci přistoupeno k zjednodušení na jednoosou napjatost. Vzhledem k magisterské úrovni byla tato úprava nutností, aby bylo možné zhodnotit únavu materiálu. Je otázkou, jak moc je toto zjednodušení v pořádku. Prvotní analýza ukázala, že napjatost je v kritickém místě téměř jednoosá (viz. Obr. 28), takže se volba analyzovat únavu pomocí experimentů pro 1D napjatost jeví jako logická.

Získané výsledky jsou přímo ovlivněny způsobem, jakým byl model zatěžován. Bylo použito zjednodušení okrajové podmínky definující výstřel. Tímto zjednodušením byla konstantní plocha tlaku v průběhu analýzy. Tento stav neodpovídá realitě a bylo by užitečné vědět, jak velká chyba byla tímto způsobena. V důsledku konstantní lokalizace okrajové podmínky je jisté, že nebyl zohledněn vliv postupné deformace hlavně. Jinak řečeno, nebylo bráno v potaz, že u skutečného výstřelu se materiálem hlavně šíří napěťová vlna. K ověření míry korektnosti výpočty by bylo potřeba provést FSI analýzu, která je schopna takovýto děj namodelovat a vyřešit.

Zanedbanou veličinou v analýze byla teplota. Vliv teploty je důležitý aspekt, který ovlivňuje projevy materiálů a mnohdy dosti významně. V případě minometu je teplota základním činitelem, který se vyskytuje při výstřelu a bez kterého se výstřel neobejde. Navíc hlavně minometů opakovaně zažívají teplotní šoky, což také může ovlivnit chování komponenty. Na druhou stranu je délka výstřelu velice krátká, je proto otázka, jak moc se těleso hlavně zahřívá. K vyřešení otázky teploty je potřeba mít k dispozici informace

o vnitřní balistice, a to s kompletními daty, které budou zahrnovat tepelné vlastnosti materiálů a také informace o teplotě hoření základní náplně, respektive i přídavných náplní.

Vliv teploty je také důležitý pro samotnou optimalizovanou geometrii. Zvolený matrix kompozitu je epoxidová pryskyřice. Tyto polymery nejsou zpravidla příliš odolné proti vysokým teplotám, proto je zanedbání teploty velký zásah do správnosti analýzy. V tomto směru je také důležité, jak by probíhala interakce kompozitu a oceli. Nebyl předpokládán žádný mezičlen mezi ocelí a kompozitem, nicméně ve skutečnosti by takový mezičlen musel být aplikován. Jednalo by se o izolační vrstvu, která by chránila kompozit před teplotami, které už pro něj nejsou přípustné. To je další aspekt, který by bylo potřeba v dalších analýzách tohoto typu zohlednit.

Bylo by dobré, kdyby bylo s tímto tématem pokračováno dále a kdyby byly vyřešeny všechny okolnosti, které byly výše zmíněny.

10. Omezení práce

Tato práce je zatížena několika limitacemi, které je potřeba mít na paměti při hodnocení práce. První limitací je použitá geometrie. Ta neodpovídá geometrii skutečného minometu 120 KRH 92, protože technické podklady ke zbráním nejsou zpravidla veřejně přístupné. Geometrie byla odvozena z informací, které bylo možné dohledat v otevřených zdrojích a následně byl odhadnut její tvar. Jedná se tedy o hrubou aproximaci tvaru, který má reálný minomet 120 KRH 92.

Další limitací je použitý materiál oceli. Ze stejného důvodu jako u geometrie, nebyly dohledatelné informace o konkrétním materiálu, ze kterého byl minomet vyráběn. Musel být nalezen jiný vhodný materiál, který by mohl být použit. V práci byla použita vysokopevnostní ocel MS 300, která je drahá, a je otázkou, zda je její cena obhajitelná při výrobě minometů. Nicméně cenová stránka konstrukčního návrhu nebyla uvažována.

Následující omezení je navržený kompozitní materiál. Jedná se o teoretický návrh materiálu, který není ověřen zkouškami. Je tedy otázkou, jak by se ve skutečnosti navržený kompozit choval. Reálný materiál obsahuje defekty, které nebyly při návrhu kompozitu zohledněny. Další nejistotou jsou materiálové vlastnosti konstituentů, protože zpravidla nejsou uvedeny všechny potřebné údaje. V této práci to platí pro karbonové vlákno, jehož vlastnosti jsou převzaty ze dvou zdrojů. Karbonová vlákna byla pokládána za transversálně izotropní, což neodpovídá realitě, protože reálná vlákna jsou anizotropní [41].

Definice zatížení během simulace výstřelu je opět zjednodušení reálného stavu. Při skutečném výstřelu se hlavní šíří tlaková vlna, která způsobuje napěťovou vlnu v materiálu. Vzhledem ke komplexnosti děje nebylo postupné šíření tlakové vlny uvažováno. Okrajová podmínka definující časový průběh tlaku při výstřelu byla aplikována na celou plochu vnitřního průměru hlavně. Aby byl děj vymodelován reálně, bylo by nutné použít tzv. FSI analýzu. Toto je nicméně nad rámec magisterského studia.

Limitace se také vyskytuje při vytváření sítě kompozitu. Byly použity skořepinové elementy. Následně byla příprava kompozitního modelu provedena v ANSYS modulu ACP (Pre). Práce s kompozity není běžnou náplní magisterského studia, což je důvodem této limitace práce. Tloušťka finálních kompozitních vrstev je v poměru ku tloušťce ocelové stěny podstatná. Absolutně korektní vyhodnocení by bylo potřeba provést verifikací pomocí modelu se solid elementy.

Limitací práce je také zanedbání vlivu teploty na napěťově-deformační chování materiálu. Vliv teploty nebyl uvažován, protože nebyly k dispozici data, která by umožňovala zohlednění této problematiky.

11. Závěr

Diplomová práce byla zaměřena na optimalizaci minometu za použití jednosměrového dlouhovláknového kompozitu. Na začátku práce byl proveden rešeršní rozbor problematiky minometů a také kompozitních materiálů. Následně bylo přistoupeno k samotnému procesu návrhu.

Prvním stanoveným cílem práce bylo sestavení výpočtového modelu ocelové hlavně minometu. Nejdříve byla definována geometrie modelu, která byla následně diskretizována do sítě. Definice plasticity byla klíčová pro zdárné uskutečnění autofretáže. Byl zvolen Chaboche model se dvěma kinematickými větvemi. Nastavení okrajových podmínek byl jeden ze stěžejních bodů této části práce. Byly definovány zátěžné stavy pro autofretáž a pro výstřel z hlavně. Posledním neméně důležitým bodem bylo stanovení optimálních časových kroků, aby byly získány korektní výsledky.

Po úspěšném nastavení výpočtového modelu bylo přistoupeno k samotné simulaci chování ocelové hlavně při zatížení. Úspěšně byla provedena autofretáž a následně bylo z hlavně vystřeleno. Tato simulace následně stanovila limity, které musí splnit i optimalizovaný kompozitní návrh.

Navržení optimalizace pomocí kompozitu bylo další částí práce. Byly stanoveny dvě varianty, které se projeví jako téměř rovnocenné. Obě varianty snížily amplitudu zatížení oproti původní součásti.

V poslední řadě je zhodnocení úspory hmotnosti, které bylo dosaženo. Obě kompozitní varianty minometu splnily očekávání a přinesly podstatnou úsporu hmotnosti 26,5 % a zároveň zlepšily napětově-deformační poměry v hlavni.

13. Bibliografie

- [1] SCHMIDT, John R., Michael J. NUSCA a Albert W. HORST. Mortar Interior Ballistics: Sensitivity Studies Using IBHVG2 and Progress Toward a Multidimensional Representation. *Army Research Laboratory ARL-TR-4838* [online]. b.r. [cit. 2020-03-02]. DOI: 10.21236/ada503149.
- [2] ANDERSON, R. D. *IBHVG2: Mortar Simulation With Interior Propellant Canister* [online]. U.S. Army Research Laboratory Weapons and Materials Research Directorate Aberdeen Proving Ground, MD 21005-5066, b.r., (--3760), 73 [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a445309.pdf>
- [3] Minomet. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Minomet>
- [4] 120 KRH 92. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: https://de.wikipedia.org/wiki/120_KRH_92
- [5] Vnitřní balistika. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Vnit%C5%99n%C3%AD_balistika
- [6] KLARKON. Dělostřelecká mina tříštivá. In: *Detektorweb.cz - detektory kovů* [online]. Praha, b.r. [cit. 2020-03-03]. Dostupné z: <http://www.detektorweb.cz/index.4me?s=show&i=31988&mm=1&vd=1>
- [7] Autofretáž. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Autofret%C3%A1%C5%BE>
- [8] BLAHA, J. *Výpočtová analýza zbytkových napětí u autofretovaných vysokotlakých zásobníků paliva*. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce J. Vrbka.
- [9] *Maximator Test – USA* [online]. Gurnee, 2020 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://maximator-test.com/autofrettage/>
- [10] JONES, Robert M. *Mechanics of compisite materials*. Second edition. New York: Taylor & Francis Group, 1999. ISBN 978-1-56032-712-7.

- [11] GIBSON, Ronald F. *PRINCIPLES OF COMPOSITE MATERIAL MECHANICS* [online]. New York: McGraw-Hill, Inc., 1994 [cit. 2020-05-16]. ISBN 0-07-023451-5. Dostupné z: [http://www.iaukhoy.ac.ir/download/Principles%20of%20composite%20materials.\(GIBSON\)..pdf](http://www.iaukhoy.ac.ir/download/Principles%20of%20composite%20materials.(GIBSON)..pdf)
- [12] DUCHÁČEK, V. VYSOKÁ ŠKOLA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ V PRAZE. *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití* [online]. 2. vyd. Praha, 2006 [cit. 2020-05-14]. ISBN 80-7080-617-6. Dostupné z: http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-617-6/pages-pdf/004.html
- [13] Laminát. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2020 [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Lamin%C3%A1t>
- [14] Sklo. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2020 [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Sklo>
- [15] Beton. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2020 [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Beton>
- [16] Raketové palivo. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Raketov%C3%A9_palivo
- [17] Cermet. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2020 [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Cermet>
- [18] *Makromechanika kompozitních materiálů: Studijní opory FS ČVUT v Praze* [online]. In: . Praha: ČVUT, b.r. [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: http://www.kompozity.info/seminar/2_seminar/3_makro_napeti.pdf
- [19] *FRP reinforcement in RC structures* [online]. Lausanne: International Federation for Structural Concrete, 2007 [cit. 2020-05-15]. ISBN 978-2-88394-080-2. Dostupné z: https://www.iranfrp.ir/wp-content/uploads/2018/12/40-FRP-reinforcement-in-RC-structures_0-1.pdf
- [20] SHAH, Darshil U., Peter J. SCHUBEL, Peter LICENCE a Mike J. CLIFFORD. Determining the minimum, critical and maximum fibre content for twisted yarn reinforced plant fibre composites. *Composites Science and Technology* [online].

- ELSEVIER, 2012, (72), 1909-1917 [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353812003089?via%3Dihub>
- [21] PAN-based Carbon Fiber & Composite Materials Pyrofil. *MITSUBISHI CHEMICAL* [online]. b.r. [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: https://www.m-chemical.co.jp/en/products/departments/mcc/cfcm/product/_icsFiles/afieldfile/2020/01/15/CFtow_Jan2020en.pdf
- [22] Types of Carbon Fiber: T1100G. In: *TORAY* [online]. b.r. [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <https://www.toraycma.com/page.php?id=661>
- [23] Technical Data Sheet EPON™ Resin 828. In: *Hexion* [online]. b.r. [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <https://www.hexion.com/CustomServices/PDFDownloader.aspx?type=tds&pid=1fb05b42-5814-6fe3-ae8a-ff0300fcd525>
- [24] *Technical Data Sheet ER2074 Epoxy Resin* [online]. In: . b.r. [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: https://res.cloudinary.com/electrolube/image/upload/v1573044178/ER2074_wfpwr3.pdf
- [25] Rule of mixtures. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, b.r. [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Rule_of_mixtures
- [26] WARNET, Laurent a Remko AKKERMAN. *Micromechanics* [online]. In: . b.r. [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.utwente.nl/en/et/ms3/research-chairs/pt/Files/images-laurent/Composites%202-2008%20Micromechanics.pdf>. Composites Course 2008-2009 – University of Twente, Eng. & Tech.
- [27] DE LUCA, Alessandro a Francesco CAPUTO. A review on analytical failure criteria for composite materials. *AIMS Materials Science* [online]. Aversa, 2017, 4(5), 1165-1185 [cit. 2020-05-15]. DOI: 10.3934/matricsci.2017.5.1165. Dostupné z: <https://www.aimspress.com/fileOther/PDF/Materials/matricsci-04-01165.pdf>
- [28] ANSYS, Inc.: ANSYS Help. *ANSYS Composite PrepPost User's Guide: Chapter 5: Theory Documentation | 5.3. Failure Analysis | 5.3.4. Failure Criteria for Reinforced Materials* [online]. b.r., , [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v191/acp_ug/acp_ug.html

- [29] 120 KRH 92. *Nazarian's Gun's Recognition Guide* [online]. b.r. [cit. 2020-03-03]. Dostupné z: http://nazarian.no/wep.asp?id=424&group_id=26&country_id=197&lang=0
- [30] TOIVOLA, Juha, Seppo MOILANEN a Henna-Riitta JUSSILA. Force, pressure and strain measurements for traditional heavy mortar launch cycle. *Rakenteiden Mekaniikka (Journal of Structural Mechanics)*. 2011, (444), 309-329.
- [31] VAN SWAM, L.F., R.M. PELLOUX a N.J. GRANT. Fatigue behavior of maraging steel 300. *Metallurgical Transactions A*. 1975, (6), 45-54. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02673669>.
- [32] MEYERS, M. A. *DYNAMIC BEHAVIOR OF MATERIALS*. 1994. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1994, s. 299. ISBN 0-471-58262-X.
- [33] Levenberg–Marquardt algorithm. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Levenberg%E2%80%93Marquardt_algorithm
- [34] HALAMA, Radim. *Experimentální poznatky a fenomenologické modelování cyklické plasticity kovů*. Ostrava, 2009. Habilitační práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní.
- [35] BABAEI, H. a H. ASGARI. Stress Analysis of Gun Barrel Subjected to Dynamic Pressure. *International Journal of Mechanical Engineering and Applications* [online]. b.r., 2015(34, 71-80 [cit. 2020-05-13]. DOI: 10.11648/j.ijmea.20150304.14. ISSN 2330-0248. Dostupné z: <http://www.sciencepublishinggroup.com/j/ijmea>
- [36] MEDDAD, A., J. AZAIEZ, A. AIT-KADI a R. GUÉNETTE. Micromechanical Modeling of Tensile Behavior of Short Fiber Composites. *Journal of COMPOSITE MATERIALS* [online]. 2002, (364, 423-441 [cit. 2020-05-13]. DOI: 10.1106/002199802023547. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.855.7359&rep=rep1&type=pdf>
- [37] System 1000 Laminating Epoxy Resin. In: *Fibre Glast* [online]. b.r. [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://s3.amazonaws.com/cdn.fibreglast.com/downloads/00949.pdf>
- [38] LO, K. H. a E. S.-M. CHIM. Compressive Strength of Unidirectional Composites. *Joual of REINFORCED PLASTICS AND COMPOSITES* [online]. Technomic Publishing Co., Inc., b.r., 2, 838-896 [cit. 2020-05-15]. Dostupné z:

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.852.2630&rep=rep1&type=pdf>

- [39] VRBKA, J. *MECHANIKA KOMPOZITŮ* [online]. In: . Brno: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2008 [cit. 2020-05-15].
- [40] LUPĂȘTEANU, VLAD, NICOLAE ȚĂRANU a SERGIU POPOAEI. *THEORETICAL STRENGTH PROPERTIES OF UNIDIRECTIONAL REINFORCED FIBER REINFORCED POLYMER COMPOSITES* [online]. “Gheorghe Asachi” Technical University of Iași Faculty of Civil Engineering and Building Services, b.r. [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <http://www.bipcons.ce.tuiasi.ro/Archive/428.pdf>
- [41] Properties of Carbon Fiber. In: *Clearwater Composites, LLC* [online]. Duluth, 2020 [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <https://www.clearwatercomposites.com/resources/properties-of-carbon-fiber/>